SEPTEMBER 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

www.spektrum.de

NEUROBIOLOGIE

Die unbekannte Seite des Gehirns

Bislang wenig beachtete Zellen fördern Denken und Lernen

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €

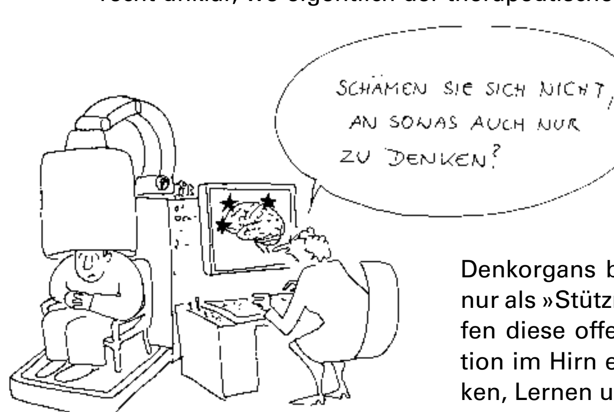


Reinhard Breuer
Chefredakteur

Was ist im Hirn wirklich los?

Vor über 130 Jahren lokalisierten Paul Broca und Carl Wernicke in der Großhirnrinde die Regionen für das Sprechen sowie das Sprachverstehen. Seitdem hat sich in der Hirnforschung viel ereignet. Der lange fast unbekannte »Kosmos Gehirn« wurde in den letzten Jahren dank trickreicher Messgeräte immer transparenter. Aber wo steht die Hirnforschung heute? Sind – nach der US-initiierten »Decade of the Brain« und inmitten der deutschen »Dekade des menschlichen Gehirns« – die wesentlichen Probleme gelöst?

Es enttäuscht vielleicht – aber was die großen Fragen angeht, scheint die Hirnforschung eher an ihrem Beginn zu stehen. Das zeigte sich kürzlich auf einem Kongress der Burda-Stiftung »Zukunft der Medizin« in Heidelberg: Der Kognitionsguru Antonio Damasio führt ein Video vom Gehirn eines Menschen vor, bei dem über präsentierte Filme Emotionen geweckt werden. Wie ein Buschfeuer breitet sich die Aktivitätszone vom Sehzentrum über das Hirn aus. Für Millisekunden steht das ganze Hirn in Flammen. Im Publikum herrscht jedoch ratloses Staunen: Was lernt man aus dieser Echtzeit-Bilderflut für die Medizin? Außer der Freude über die technische Errungenschaft bleibt doch recht unklar, wo eigentlich der therapeutische Nutzen liegt.



Auch sicher geglaubte Konzepte geraten wieder ins Wanken: Wie in unserer Titelgeschichte berichtet wird, fällt derzeit ein Dogma der Hirnforschung über Nervenzellen. Etwa neunzig Prozent unseres Denkorgans besteht aus Zellen, die bislang nur als »Stützmasse« galten. Tatsächlich greifen diese offenbar aktiv in die Kommunikation im Hirn ein – mit Folgen für unser Denken, Lernen und Erinnern (S. 46).

Und schließlich der heiß umstrittene Gral der Hirnforschung: das Problem des freien Willens. Wer oder was entscheidet wirklich darüber, was wir tun? Die Kontroverse der letzten Monaten dazu etwa in der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung« zeigt, dass hier offenbar nicht einmal immer klar war, wovon die Kombattanten eigentlich redeten. Jetzt haben sich die Wortführer der Neuromaterialisten, Gerhard Roth und Wolf Singer, erneut zu Wort gemeldet (Dt. Z. f. Philosophie, 52, S. 223 und 235, 2004). Mehr Vorsicht statt apodiktischer Behauptungen ist beiden Hirnforschern nun deutlich anzumerken. Wolf Singer, der die Unterscheidung zwischen »gänzlich unfreien, etwas freieren und ganz freien Entscheidungen« weiterhin für »problematisch« hält, sagt: »Keiner kann anders, als er ist« – eine Einsicht, die »zu einer humaneren, weniger diskriminierenden Beurteilung von Mitmenschen führen« könnte. Und Gerhard Roth warnt die eigene Zunft vor der Gefahr »der von Neurowissenschaftlern nicht selten vertretenen Auffassung, es gebe jenseits der neuronalen Vorgänge nichts mehr zu erklären«. Eine Einladung an Neurologen und Philosophen, die großen Fragen miteinander statt gegeneinander zu klären.

PS: Dieser Ausgabe haben wir einen Fragebogen beigelegt, den Sie auch online beantworten können (www.spektrum.de/fragebogen). Ihre Meinung ist uns wichtig!

INHALT

SEPTEMBER 2004

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Die Zellen um die Neuronen des Gehirns sind für unser Denken weit wichtiger als gedacht
Bild: Jeff Johnson, Hybrid Medical Animation

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 26

ASTROPHYSIK

Der ungewöhnliche Tod gewöhnlicher Sterne

In rund fünf Milliarden Jahren wird die Sonne in einem spektakulären Finale vergehen. So wie andere Sterne ihrer Größe wird sie sich in eines der schönsten Kunstwerke der Natur verwandeln: einen planetarischen Nebel



SEITE 36

ARCHÄOLOGIE

Çatal Hüyük – Stadt der Frauen?

Lebten Bauern der Steinzeit im Matriarchat? Neue Funde aus einer der größten Siedlungen jener Zeit widersprechen bisherigen Theorien

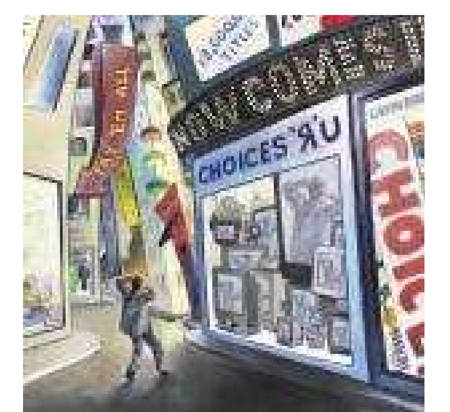


ERDGESCHICHTE

SEITE 62

Als Mikroben das Klima bestimmten

In der Frühzeit der Erde war die Sonne zu schwach, um den jungen Planeten warm zu halten. Er wurde nur deshalb nicht zum Eiskeller, weil Mikroben das Treibhausgas Methan in großen Mengen produzierten





SEITE 70

PSYCHOLOGIE

Qual der Wahl

Wem viele Alternativen offen stehen, der darf sich glücklich schätzen – sollte man meinen. Tatsächlich zeigen empirische Studien, dass ein Überangebot an Wahlmöglichkeiten eher unglücklich macht



TITELTHEMA HIRNFORSCHUNG SEITE 46

Die unbekannte Seite des Gehirns

Lange standen die so genannten Gliazellen im Schatten der Neuronen, galten sie doch vor allem als Stützstruktur im Gehirn. Doch sie scheinen vieles zu beeinflussen – sogar, wie wir denken, lernen und uns erinnern

SEITE 76

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Der schwierige Weg von Ptolemäus zu Kopernikus

Muslimische Astronomen übersetzten im Mittelalter nicht nur die astronomischen Werke der Griechen ins Arabische. Möglicherweise beeinflussten sie damit die kopernikanische Wende unseres Weltbilds

SEITE 86

MATHEMATIK

Die Lösung eines Jahrhundertproblems

Experten halten für wahrscheinlich, dass der russische Mathematiker Grigori Perelman die berühmte Poincaré'sche Vermutung bewiesen hat

SEITE 110

SPEKTRUM-ESSAY

Mensch auf Abwegen

Ein winziger Defekt in unserer DNA kann unsere ganze Persönlichkeit umkrempeln, ja uns sogar straffällig werden lassen



REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM …

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Gehirnverbesserung für alle

Nicht jeder hält es ohne weiteres für moralisch vertretbar, die Leistung unseres Gehirns künstlich zu steigern. Ein anerkannter US-Bioethiker befürwortet Denkverstärker – unter Auflagen

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Warum gähnen wir?

Juli 2004

Der Autor erwähnt, dass man während des Gähnens kurzfristig schlechter hört, »weil sich ein Verbindungsgang zwischen Ohr und Mundraum schließt«. Genau das Gegenteil ist der Fall, denn der normalerweise geschlossene Verbindungsgang, die so genannte Eustachische Röhre, wird beim Gähnen geöffnet. Sie wird beim Schlucken durch die Kontraktion des Gaumensegelspanners, der von der knorpeligen Tubenwand ausgeht, kurz geöffnet und gestattet einen Druckausgleich zwischen der im Mittelohr eingeschlossenen und der umgebenden Luft.

Beim Gähnen wird die Tube für mehrere Sekunden durch den Muskelzug offen gehalten. Die Schallwellen treffen dann gleichzeitig über die Tube von innen und durch den Gehörgang von außen auf das Trommelfell und löschen sich gegenseitig teilweise aus.

Gähnen geht mit einer ganz charakteristischen Mimik einher. Die Muskeln im Nacken spannen sich, sodass der Kopf nach hinten gestreckt wird. Das ist erforderlich, um dem starken Zug der Muskeln, die den Unterkiefer nach unten ziehen, entgegenzuwirken und den Raum zwischen Unterkiefer und Brustbein zu vergrößern. In der Karikatur von OH auf Seite 75 wird das hervorragend dargestellt. Bei der Frau mit einem Hirntumor auf Seite 74 vermisst man diese typischen Merkmale.

Prof. H. Feldmann, Münster

▼ Beim Gähnen können die Augen nur mühsam offen gehalten werden.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Spiele mit ebenen Spiegeln

Physikalische Unterhaltungen
Juni 2004

In diesem Beitrag wird eine psychologisch interessante und überraschende Eigenschaft von Spiegeln nicht berichtet. In einem gewöhnlichen Spiegel sieht man sich tatsächlich von vorne – das eigene Gesicht ist allerdings nur halb so groß wie »in Wirklichkeit« zu sehen. Sie können es nachmessen: Am besten zeigt Ihr Partner im Spiegel Ihre Körperlänge an – auch sie ist nur etwa halb so groß wie Sie selbst.

Meist bemerken wir diese Größenveränderung nicht: Eine wichtige Eigenschaft menschlicher Wahrnehmung ist es, die Objekte im dreidimensionalen Raum – unabhängig von ihrer Entfernung und damit der Größe auf der Netzhaut – stets gleich groß erscheinen zu lassen.Und dieses Wahrnehmungsgesetz arbeitet so effektiv, dass uns selbst die verkleinerte Darstellung von Menschen im TV oder im Spiegel kaum auffällt. Weitere interessante Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung finden sich auf unserer Homepage vislab.ch/vwsk_tutorial2/.

Dr. Bernd Kersten, Bern

Essen wir zu viel Fleisch?

Editorial Juni 2004

Die enorme Wassermenge zur Fleischerzeugung ist in unseren Breiten eigentlich nicht das Problem. Fest steht: Die Erzeugung von Fleisch ist viel aufwändiger und kostenintensiver als der Anbau von Agrarprodukten für Lebensmittel.

Allerdings sehe ich das Hauptproblem in unseren Lebensmittelmärkten. Sie stellen in den Werbezeitungen die Fleischprodukte im Gegensatz zu anderen Lebensmitteln deutlich stärker und umfangreicher dar. Im Laden selbst präsentieren sie Erstere auch sehr auffallend, haben eigens dafür Theken mit Bedienpersonal und bieten darüber hinaus auch noch abgepackte Fleischwaren an. Die anderen Lebensmittel werden nicht so augenfällig dargeboten. Der geringere Fleischkonsum wäre durchaus zu begrüßen!

Rudolf Kreck, Bad Vilbel

Die Ursachen der Eifersucht

Juni 2004

Warum nimmt der Artikel keinen Bezug zum kulturell-religiösen Hintergrund? Ich gehe davon aus, dass ein Großteil der Befragten in den Studien einem christlich geprägten Kulturkreis entstammt, einige vermutlich auch aus einem hinduistischen, islamischen, jüdischen oder anderen. Klare Aussagen zur Eifersucht erfordern Untersuchungsansätze, die diese kulturellen Wurzeln und ihre Auswirkungen berücksichtigen.

Welche kulturell-gesellschaftlichen Faktoren mögen dabei außerdem beteiligt sein? Schönheits- und Jugendwahn – Individualismus, Kollektivismus etc. Ist Eifersucht ein Phänomen aller Gesellschaften? Muss man nicht, wenn ich die Wirkung von Eifersucht im Selektionsdruck der urzeitlichen Gesellschaft kennen lernen will, zuallererst noch existierende ursprüngliche Völker untersuchen?

Udo Bücherl, Merseburg

Nach uns die Eiszeit?

Juli 2004

Die Aussagen der IPCC-Autoren über die Klimaschädlichkeit des anthropogenen CO_2 entbehren solider Grundlagen, weil die Mechanismen erdhistorischer Klimaschwankungen noch nicht hinreichend bekannt sind.

Die Klimavariabilität ist seit jeher extrem groß. Höhere globale Temperaturen mit teils größeren atmosphärischen CO_2-Gehalten als heute wechselten, zum Teil überraschend schnell, mit Kaltzeiten. Auch die modernsten Klima-Computermodelle sind noch zu ungenau und können wichtige Phänomene wie die Wolkenbildung oder den Beitrag der Sonne (etwa Magnetfeld) nicht gut genug simulieren, sodass in der Theorie weder die globale Klimahistorie noch lokale Effekte wie der El Niño resultieren. Die erst seit etwa 1997 massiv vertretene Aussage, dass die aktuelle Klimaerwärmung ohne menschenverursachtes CO_2 unerklärbar sei, ist fragwürdig, weil nicht erwartet werden darf, dass ungenaue Modelle den anthropogenen CO_2-Beitrag zuverlässig herausfiltern.

Die Vergangenheit zeigt, dass auch unsere Erwärmungsphase zwanglos natürlichen Ursprungs sein könnte, wobei in diesem Zusammenhang an die von 1940 bis 1975 andauernde Abkühlungsperiode (trotz steigendem CO_2) erinnert werden darf, die sogar zu Befürchtungen über eine neue Eiszeit Anlass gab. Kritikwürdig ist nicht die gute wissenschaftliche Arbeit des IPCC, sondern das Verschweigen vor der uninformierten Öffentlichkeit, dass die CO_2-Warnungen nur Wahrscheinlichkeitsschätzungen sind.

Die massive europäische Agenda in Richtung Kioto-Protokoll ist faktisch unsin-

nig. Jeder Experte bestätigt, dass erst weit stärkere und wohl unbezahlbare CO_2-Reduktionen, falls CO_2 überhaupt maßgebend verantwortlich ist, wirksam sein können.

Stark überzogen erscheinen auch die IPCC-Katastrophenszenarien. CO_2-bedingte Anstiege der Meeresspiegel sind bis heute nicht belegt, Meeresspiegel ändern sich seit Jahrhunderten, ohne dass man die Ursachen kennt. Aus dem sehr warmen Mittelalter wird von keiner Überschwemmung der Malediven oder pazifischen Inseln berichtet. Die maximalen Windstärken im Nordatlantik nehmen seit Jahrzehnten leicht ab. Alpengletscher schmelzen zwar, die globale Gletscherbilanz wird aber nicht messbar kleiner. Die biologische Artenvielfalt steigt mit höheren Temperaturen und Pflanzen (Getreide) wachsen bei höheren CO_2-Gehalten besser, sodass globale Erwärmung für die Menschheit insgesamt nicht ungünstig sein muss.

Die Unausgewogenheit des Spektrum-Artikels ist zu bedauern.

Prof. H.-J. Lüdecke, Saarbrücken

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Antwort des Autors Dr. Harald Kohl

Prof. Lüdecke behauptet, die Verpflichtungen des Kioto-Protokolls seien prinzipiell wirkungslos und das Protokoll daher kaum geeignet, das Klima zu stabilisieren. Das ist falsch.

Das Kioto-Protokoll allein wird den Klimawandel nicht stoppen. Die für den ersten Zeitraum vereinbarten Reduktionspflichten sind ein erster Schritt, ein Signal, dass die internationale Staatengemeinschaft bereit ist, gemeinsam zu handeln. Das ist nicht selbstverständlich. Denn viele Länder haben divergierende Interessen: Industrie- und Entwicklungsländer, rasch expandierende Ökonomien in Schwellenländern, vom Klimawandel besonders betroffene Länder wie kleine Inselstaaten, Erdöl exportierende Länder usw. Sie alle an einen Tisch zu bringen und gemeinsame Verpflichtungen anzuerkennen ist notwendige Voraussetzung, wenn der Klimawandel überhaupt gebremst werden soll.

Hinreichend ist dies allerdings keineswegs. Die Klimarahmenkonvention verlangt, eine Stabilisierung der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Deshalb ist eine Weiterentwicklung der Kioto-Ziele über 2012 hinaus dringend notwendig – und auch im Kioto-Protokoll vorgesehen. Die Verpflichtungen der Industrieländer, ihre Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren, müssen noch deutlich anspruchsvoller werden. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung zu Globalen Umweltveränderungen hat abgeschätzt, dass Industrieländer bis 2050 rund 80 Prozent weniger Treibhausgase emittieren dürfen als 1990, um dieses Ziel zu erreichen. Ohne weltweite, multilaterale Unterstützung, auch durch die USA und Länder wie China und Indien, wird der Klimawandel kaum zu bremsen sein. Das Kioto-Protokoll bildet dazu den geeigneten Rahmen.

Prof. Lüdecke behauptet auch, der IPCC betreibe Panikmache und unterschlage

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Eiszeit in Manhattan – glücklicherweise bisher nur im Film

wissenschaftliche Erkenntnisse. Tatsache ist, dass die vom IPCC unter Mitarbeit von Tausenden von Wissenschaftlern aus aller Welt erstellten wissenschaftlichen Sachstandsberichte die relevanten, wissenschaftlich begutachteten Veröffentlichungen berücksichtigen und selbst wiederum einer eingehenden wissenschaftlichen Überprüfung unterworfen werden. Dass der Klimawandel bereits begonnen hat, dass er sich in den kommenden Jahrzehnten mit teilweise drastischen Folgen fortsetzen wird und dass nur rasche und umfassende Emissionsreduktionen die Folgen für das globale Klima abschwächen können, das ist in weiten wissenschaftlichen Kreisen unumstritten.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Cornelia Betsch, Hermann Englert, Dr. Angelika Franz, Dr. Werner Gans, Dr. Gabriele Herbst, Dr. Michael Joachim, Stephen Koszudowski.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061-50, Fax 06201 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson



VERHALTEN

Navigationsgesteuerte Kampfeslust

Die Tunesische Wüstenameise *(Cataglyphis fortis)* verfügt über ein Navigationssystem, das sie nach Hause geleitet, selbst wenn sie sich auf der Futtersuche bis zu hundert Meter von ihrem unterirdischen Bau entfernt hat (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 56). Wie Markus Knaden und Rüdiger Wehner von der Universität Zürich nun bewiesen, nutzt sie dieses System aber noch für einen anderen Zweck: um zu entscheiden, ob sie einen vorbeispazierenden Artgenossen attackieren soll, weil er ihrem Nest zu nahe kommt, oder ob sie ihn – in sicherer Entfernung von ihrem Zuhause – in Ruhe lässt. Die Schweizer Forscher ließen die Ameisen zu einer künstlichen Futterquelle marschieren, die sich zwanzig Meter nördlich von ihrem Bau befand. Nach der Mahlzeit setzten sie die Tiere dann zwei Kilometer weiter in der öden Wüste aus. Die ahnungslosen Ameisen, die zurück nach Hause wollten, rannten zielstrebig nach Süden, wo sie ihr Nest vermuteten. Die hinterlistigen Forscher aber störten ihren Heimweg: Sie konfrontierten einige Tiere nach fünf, andere nach zwanzig Metern mit einem Artgenossen. Im ersten Fall lief die Begegnung friedlich ab, im zweiten dagegen wurde der potenzielle Eindringling sofort angegriffen. Das beweist: Die Ameise verlässt sich nicht auf topografische Merkmale, sondern allein auf ihr Navigationssystem, um die Nähe zu ihrem Bau abzuschätzen und die von einem Artgenossen drohende Gefahr zu beurteilen. *(Science, 2.7.2004, S. 60)*

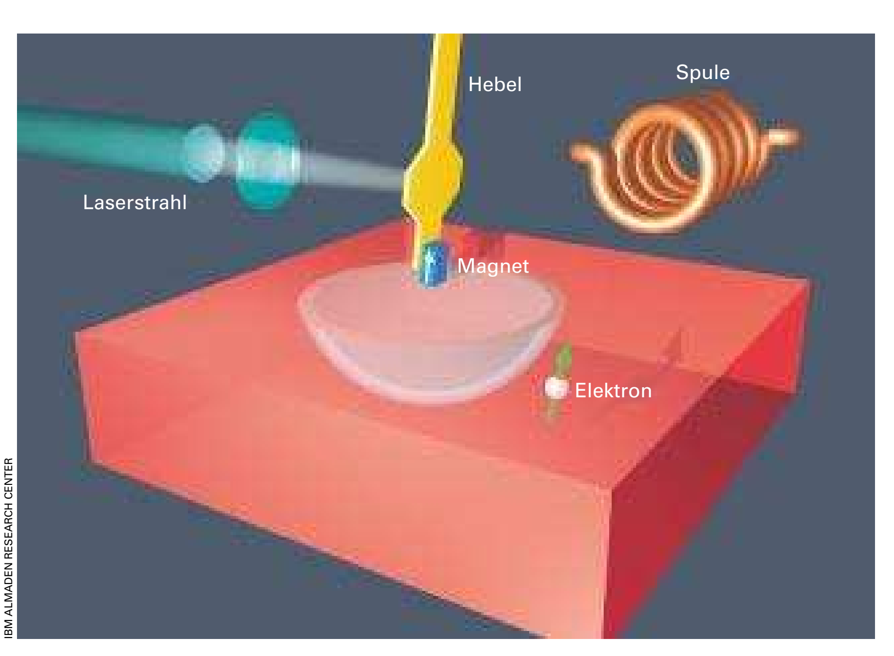
PHYSIK

Magnetkraft des Elektrons gemessen

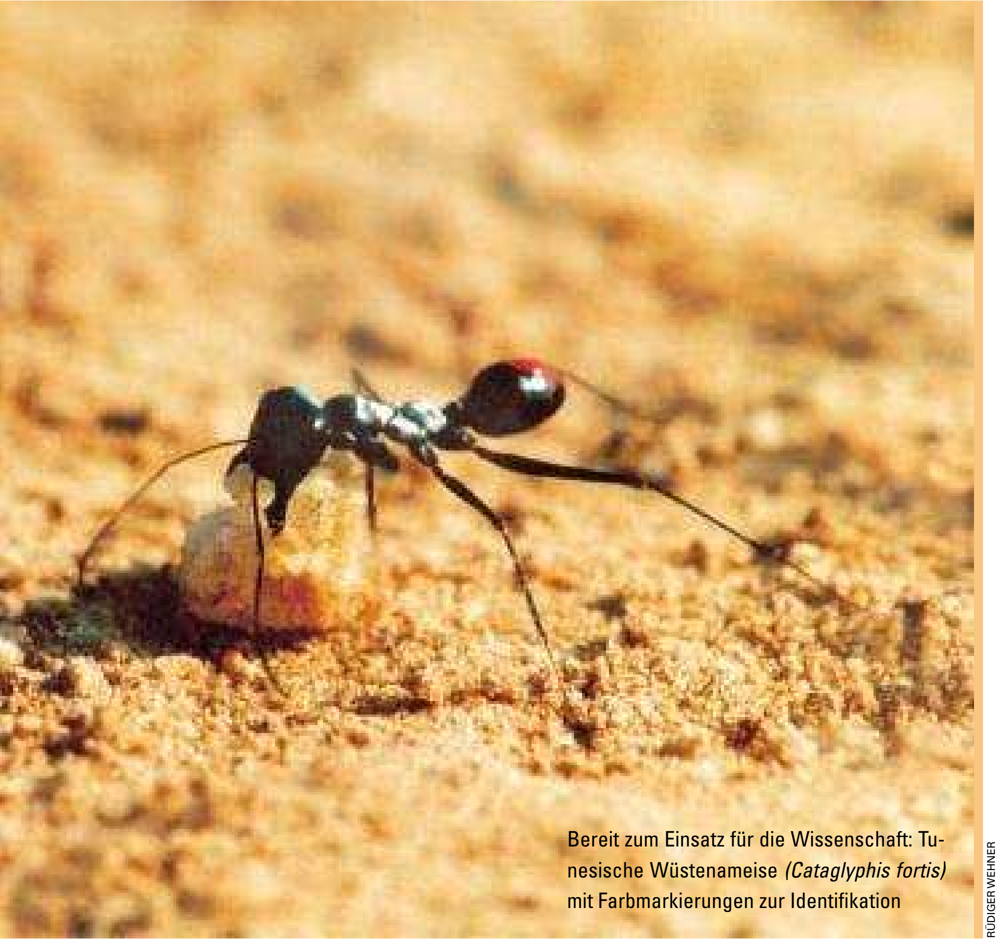
Wie angeschnittene Tennisbälle haben auch Elektronen einen Drall. Quantenphysiker bezeichnen diese Eigendrehung als Spin. Sie erzeugt bei elektrisch geladenen Teilchen zugleich ein magnetisches Moment. Jetzt ist es dem Team von Dan Ruger am IBM-Forschungszentrum in San Jose (Kalifornien) erstmals gelungen, das magnetische Moment eines einzelnen Elektrons zu messen – eine Kraft, die zehn Billionen Mal kleiner ist als das Gewicht einer Schneeflocke.

Die Wissenschaftler benutzten ein selbst konstruiertes Gerät, dessen Empfindlichkeit sie in zwölfjähriger Arbeit stetig gesteigert haben (Schemazeichnung). Ein winziger Hebel mit Minimagnet an der Spitze schwingt dabei in einem magnetischen Wechselfeld, das von einer elektrischen Spule erzeugt wird. Durch die Wechselwirkung mit dem Elektron ändert sich die Schwingungsfrequenz. Aus dieser Änderung, die per Laser gemessen wird, lässt sich das magnetische Moment des Teilchens ermitteln.

Ruger erhofft sich von seinem hochempfindlichen Magnetresonanz-Rastermikroskop tiefe Blicke ins Innere dotierter Halbleitermaterialien mit überschüssigen Elektronen, die in der Elektronik eingesetzt werden. Außerdem könnte das Gerät dazu dienen, in künftigen Quantencomputern Informationen auszulesen, die in der Orientierung von Elektronenspins gespeichert sind. *(Nature, 15.7.2004, S. 329)*



Mit dem Magnetresonanz-Rastermikroskop – hier eine Schemazeichnung – lässt sich selbst das magnetische Moment eines einzelnen Elektrons bestimmen.



Bereit zum Einsatz für die Wissenschaft: Tunesische Wüstenameise *(Cataglyphis fortis)* mit Farbmarkierungen zur Identifikation

RÜDIGER WEHNER

IMMUNSYSTEM

Die Antikörper der Neunaugen

Unser hoch entwickeltes adaptives Immunsystem, das jeden Eindringling mit speziell auf ihn zugeschnittenen Waffen bekämpft, reicht stammesgeschichtlich weit zurück. Allerdings war bisher unklar, ob auch die fischartigen Neunaugen darüber verfügen – primitive kieferlose Wirbeltiere, die als einzige Vertreter einer vor 400 Millionen Jahren ausgestorbenen Tiergruppe bis heute überdauert haben. Immunologische Versuche erweckten den Anschein, aber niemand konnte auch nur eine der charakteristischen Komponenten des adaptiven Immunsystems – etwa Antikörper (Immunglobuline) – bei den Neunaugen nachweisen. Forscher um Zeev Pancer von der Universität von Alabama in Birmingham haben jetzt den Grund dafür entdeckt. Demnach produzieren die Neunaugen sehr wohl Antikörper, aber diese haben nicht die typische Y-Form und sind auch sonst völlig anders aufgebaut als die bisher bekannten Immunglobuline. Gleich ist nur das Grundprinzip: Durch Kombination verschiedener Sorten von Bausteinen wird eine große Vielfalt an Strukturen erreicht. Zu klären bleibt, ob das adaptive Immunsystem der Neunaugen eine Vorform unseres heutigen oder eine frühe Sonderentwicklung darstellt, die in einer Sackgasse endete. *(Nature, 8.7.2004, S. 174)*

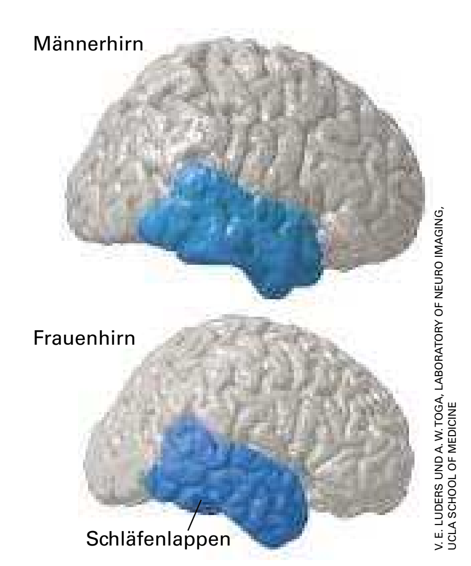
▼ Sechs Neunaugen haften mit ihrem kieferlosen Rundmaul an der Scheibe eines Aquariums.



GREAT LAKES FISHERY COMMISSION

HIRNFORSCHUNG

Nicht die Größe zählt bei Frauen



V. E. LUDERS UND A. W. TOGA, LABORATORY OF NEURO IMAGING, UCLA SCHOOL OF MEDICINE

◀ Das männliche Gehirn (oben) ist zwar größer, dafür aber – speziell im rechten Schläfenlappen – weniger gefurcht als das weibliche (unten).

Obwohl Frauen kleinere Köpfe und damit weniger Hirnmasse haben als Männer, sind sie keineswegs dümmer. Wie kommt das? Die herkömmliche Erklärung stützt sich darauf, dass die Intelligenz nicht von der Hirnmasse an sich, sondern von ihrer Relation zum Körpergewicht abhängt. Frauen aber haben im Durchschnitt auch einen kleineren und leichteren Körper als die Herren der Schöpfung.

Doch das ist offenbar noch nicht alles. Beim Vergleich dreidimensionaler Magnetresonanzaufnahmen der Gehirne von je dreißig Männern und Frauen fanden Forscher um Eileen Luders von der Universität Frankfurt nun heraus, dass der weibliche Cortex stärker gefurcht ist. Das gilt vor allem für den Bereich der rechten Hirnhälfte, in dem unter anderem Emotionen verarbeitet werden. Nun ist die Leistungsfähigkeit des Cortex bekanntlich proportional zu seiner Oberfläche. Die Furchung des menschlichen Gehirns dient dazu, diese Oberfläche zu vergrößern, ohne das Volumen zu erhöhen.

Damit ist klar, warum Frauen gleich viel Grips wie Männer haben: Sie machen den Nachteil des kleineren Schädels durch mehr Hirnwindungen wett. Dass das vor allem die rechte Hemisphäre betrifft, erklärt die größere emotionale Intelligenz des weiblichen Geschlechtes. *(Nature Neuroscience, im Druck)*



Ebenso bunt wie aufschlussreich: Ultraviolett-Aufnahme eines Ausschnitts der Saturnringe (in Falschfarben)

ASTRONOMIE

Saturnringe im Farbenrausch

Ein Instrument an Bord der Raumsonde Cassini hat die Saturnringe nun auch bei verschiedenen ultravioletten Wellenlängen abgelichtet. In Falschfarben wiedergegeben, liefern die Aufnahmen ein wundervoll buntes Bild. Zugleich aber lassen sie auf die chemische Zusammensetzung der einzelnen Ringe und auf die Größe der enthaltenen Teilchen schließen. In rötlichen Tönen erscheinen schmutzigere und kleinere Staubpartikel, die vermutlich überwiegend aus Silikaten und Kohlenwasserstoffen bestehen. Sie konzentrieren sich vor allem auf die inneren Bereiche des Ringsystems. Weiter außen dominieren – in Türkisfarben – Eispartikel, die aus Wasser und Ammoniak bestehen dürften. Diese Verteilung könnte Hinweise auf den Ursprung und die Entwicklung der Ringe liefern. Die Aufnahme hat etwa die hundertfache Auflösung der besten bisherigen UV-Bilder. *(Jet Propulsion Laboratory, 9.7.2004)*

TECHNIK

Segelboot überholt den Wind

Doppelt so schnell segeln wie der Wind – und das, wenn einem die Brise direkt entgegenbläst? Klingt unmöglich, aber Stephen Bourn arbeitet daran. Als Mathematiker bei der australischen Defence Science and Technology Organisation (DSTO) in Adelaide hat er ausgerechnet, dass seine Vision mehr als ein Hirngespinst ist. Mit einer Reihe ferngesteuerter Miniaturmodelle erprobt er derzeit den Supersegler – ein Prototyp in Originalgröße ist in Planung. Das Schiff wird von einem schwebenden Segel gezogen, das der Tragfläche eines Flugzeugs ähnelt. Der Rumpf mit dem Cockpit für den Steuermann ruht auf drei Kufen. Bei genug Wind soll er komplett von der Wasseroberfläche abheben, was den Widerstand auf die drei Stelzenbeine beschränkt. Das Schiff ist so konstruiert, dass es auch bei extremem Druck auf das Segel nicht kentern kann. So wird der Wind, anders als bei herkömmlichen Booten, stets maximal ausgenutzt – und zwar unabhängig davon, aus welcher Richtung er weht. *(Defence Science and Technology Organisation, 28.7.2004)*



JEANETTE MILLIKAN

Modell des Superseglers im Test

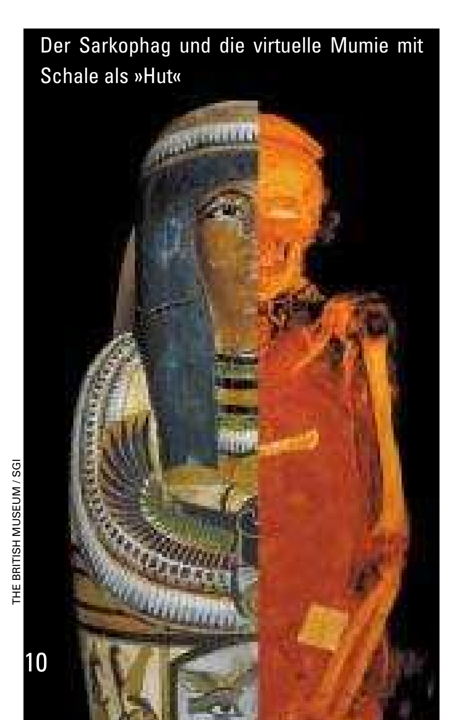
ARCHÄOLOGIE

Gläserne Mumie offenbart Kunstfehler

Seit 1899 lagerte der fast 3000 Jahre alte Sarkophag mit der Mumie des Hohepriesters Nesperennub unangetastet im Britischen Museum in London. Schon lange wollte Kurator John Tylor einen Blick auf die einbalsamierte Leiche werfen. Doch scheute er davor zurück, die Leinenbänder zu entfernen, in die sie eingewickelt war. Stattdessen zog er schließlich den Computerspezialisten David Hughes von der Firma Silicon Graphics hinzu. Gemeinsam durchleuchteten sie die sterblichen Überreste im Computertomografen und setzten die 1500 Einzelscans mit Hilfe eines Hochleistungsrechners zu einem dreidimensionalen Modell zusammen. Damit war Nesperennub zur ersten gläsernen Mumie geworden. Per Mausklick kann man sie nun auf einer virtuellen Reise am Bildschirm erkunden und unter beliebigen Blickwinkeln mit und ohne Leinenbänder betrachten, ohne ihre Totenruhe zu stören.

Durch Analyse der Schädelnähte und des Gebisses ermittelten die Forscher, dass Nesperennub im Alter von vierzig bis fünzig Jahren starb. Besonders merkwürdig fanden sie eine Tonschale, die außen am Schädel klebte – nie zuvor war etwas Derartiges an einer Mumie entdeckt worden. »Die Schale ist zu plump, um Teil eines religiösen Rituals zu sein«, sagt Taylor. Er vermutet, dass sie unter den Kopf gestellt wurde, um abtropfendes Balsamierharz aufzufangen. Dabei klebte sie versehentlich fest. Risse in der umgebenden Kopfhaut zeugen von dem vergeblichen Versuch, sie gewaltsam abzureißen. Dennoch konnten die Einbalsamierer den Pfusch offenbar verbergen – jedenfalls knapp 3000 Jahre lang. *(The British Museum, 1.7.2004)*

Der Sarkophag und die virtuelle Mumie mit Schale als »Hut«



THE BRITISH MUSEUM / SGI

Mitarbeit: Dagny Lüdemann

Rasierklingen auf dem Mars

Der Marsrover Opportunity ist auch ein halbes Jahr nach seiner Landung noch eifrig dabei, den Roten Planeten zu erkunden. Jetzt hat er im Inneren des Kraters Endurance interessante Gesteinsbildungen entdeckt: schmale Grate, die wie Rasierklingen senkrecht aus dem Boden ragen. Nach Ansicht der Nasa-Forscher bezeugen sie, dass Wasser für lange Zeit die Geologie des Mars geprägt hat. Offenbar schieden sich aus wässrigen Lösungen, die durch Spalten im Boden zirkulierten, im Laufe von Jahrmillionen Mineralien ab, die härter als der umgebende Untergrund waren. Bei der späteren Erosion – gleichfalls durch Wasser – blieben diese »Erzadern« deshalb stehen. Die Grate sind nur wenige Zentimeter hoch und etwa einen halben Zentimeter dick. Sie säumen den Rand von Vertiefungen, die wie ehemalige Abflussrinnen aussehen.

Ungewöhnlich sind auch die Kügelchen, die den Boden übersäen und von den Nasa-Forschern salopp Blaubeeren getauft wurden. Nach Analysen durch Opportunity enthalten sie große Mengen des Eisenminerals Hämatit. Ihr Ursprung ist umstritten, aber die meisten Forscher glauben, dass sie sich aus schmutzigem Wasser ausgeschieden haben. Die Kügelchen erscheinen nur auf diesem Falschfarbenbild bläulich und sind in Wahrheit grau.



MARS EXPLORATION ROVER MISSION, JPL / NASA

NEUROINFORMATIK

Der Mensch denkt – der Computer lenkt?

Noch gibt es die Verzahnung des menschlichen Gehirns mit einem Computer nur in Science-Fiction-Romanen; doch für einige Querschnittsgelähmte in den USA wird sie möglicherweise bald Realität. Auch deutsche Forscher berichten von ersten Erfolgen.

Von Gerhard Samulat

Die Firma Cyberkinetics in Foxborough (Massachusetts) sucht Freiwillige. Die Bedingung: Sie müssen vom Halswirbel abwärts querschnittsgelähmt sein, sich aber noch artikulieren können. Die amerikanische Behörde für Arzneimittelzulassung (FDA) hat dem Unternehmen kürzlich die Erlaubnis erteilt, fünf derartigen Patienten Mikrochips in ihre Gehirne einzupflanzen. Die Sensoren sollen die fast bewegungsunfähigen Menschen wieder in die Lage versetzen, allein durch ihre Gedanken einen Computer zu bedienen, und ihnen so ein Stück Eigenständigkeit zurückgeben.

Miguel A. L. Nicolelis von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) und John K. Chapin vom Downstate Medical Center der Staatlichen Universität von New York ist dieser Versuch an Tieren bereits gelungen (Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 74): Rhesusaffen bewegten allein mit Geisteskraft einen künstlichen Arm. Tim Surgenor, Chef von Cyberkinetics, will die nur wenige Quadratmillimeter große Schnittstelle zum Computer nun auch den Querschnittsgelähmten auf die Oberfläche der primären motorischen Hirnrinde implantieren – und hofft auf denselben Erfolg.

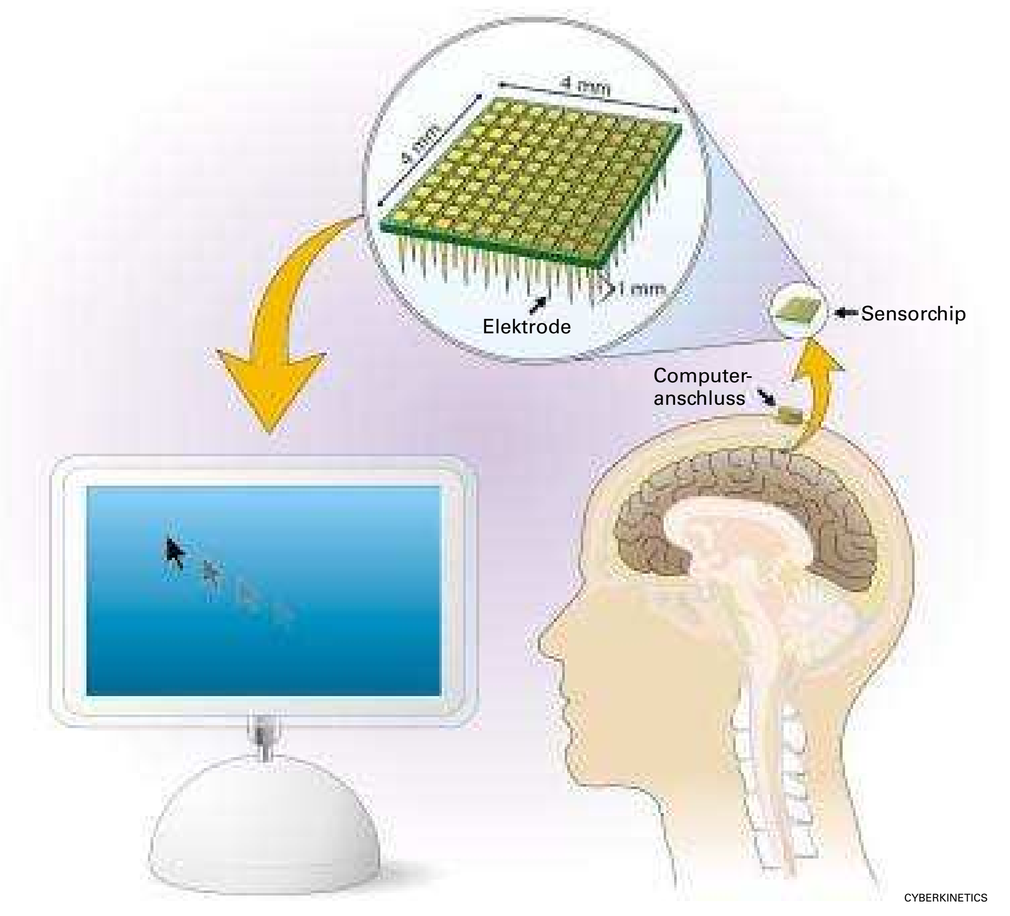
Was in den Vereinigten Staaten bald Realität wird, scheint hier zu Lande noch undenkbar zu sein. Dabei lebt einer der Wegbereiter dieser Art von Forschung in Deutschland. Peter Fromherz vom Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München gelang es schon Anfang der 1990er Jahre, Nervenzellen einer Schnecke gezielt mit Transistoren von Halbleiterchips zu koppeln und Informationen aus den Neuronen in die Chips sowie zurück zu übertragen (Spektrum der Wissenschaft 2/1992, S. 16). Für seine Arbeiten erhielt der mittlerweile 61-Jährige kürzlich einen der mit insgesamt 100 000 Euro dotierten Philip-Morris-Forschungspreise.

Noch gibt es nur wenig Erfahrung mit dauerhaft im Schädel implantierten Elektroden. Deshalb ist auch das amerikanische Experiment zunächst auf dreizehn Monate angelegt. Danach sollen die eingepflanzten Mikrochips wieder operativ entfernt werden – es sei denn, die Studie zieht bei erfolgreichem Ausgang weitergehende Untersuchungen nach sich, an denen der jeweilige Patient ebenfalls teilnehmen möchte.

Haube mit 128 Elektroden

In Deutschland ist man dagegen vorsichtiger und setzt vorerst auf nichtinvasive Methoden. So verwenden Gabriel Curio von der neurologischen Klinik der Berliner Charité und Klaus-Robert Müller vom Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik (FIRST) aus Berlin-Adlershof eine jederzeit wieder abnehmbare Haube. Damit entfällt der riskante operative Eingriff.

Das Brain Computer Interface der Berliner Wissenschaftler ist mit insgesamt 128 Elektroden versehen, die auf der Kopfhaut der Versuchsperson ange- ▷

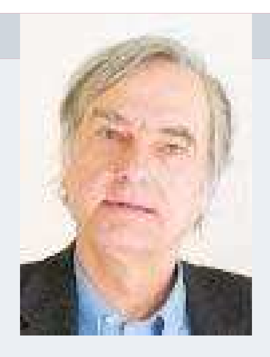


◀ Einen 4 × 4 Millimeter großen Chip wollen US-Forscher auf der motorischen Hirnrinde von fünf schwer querschnittsgelähmten Patienten anbringen. Mit seinen hundert Elektroden wird er die neuronale Aktivität registrieren und an einen Computer weiterleiten. Indem die Patienten diese Aktivität geeignet beeinflussen, sollen sie allein mit der Kraft ihrer Gedanken einen Cursor steuern können.

INTERVIEW

»Verbessernde Eingriffe ins Gehirn sind nicht prinzipiell abzulehnen«

Ist es ethisch vertretbar, die geistige Potenz gesunder Menschen mit Gehirnprothesen zu steigern? **Dieter Birnbacher**, Philosoph an der Universität Düsseldorf, nimmt Stellung.



Dieter Birnbacher ist Professor für Praktische Philosophie an der Universität Düsseldorf. Er beschäftigt sich vor allem mit ethischen Fragen der modernen Medizin.

Spektrum der Wissenschaft: Amerikanische Forscher wollen querschnittsgelähmten Personen einen Mikrochip ins Gehirn pflanzen. Lässt sich ein solcher Eingriff nur bei Kranken rechtfertigen oder muss man demnächst auch Gesunden zugestehen, mit einer Gehirnprothese ihre geistigen oder motorischen Leistungen zu steigern?

Dieter Birnbacher: Das ist die ethische Gretchenfrage. Es gibt gegen Technologien wenig Vorbehalte, wenn sie zur Kompensation von pathologischen oder unfallbedingten Defiziten dienen. Leistungssteigernde Eingriffe stoßen hingegen auf Widerstand. Die so genannten Biokonservativen – darunter Leon Kass, der Chefberater von US-Präsident Bush – halten es prinzipiell nicht für zulässig, Naturgegebenheiten durch Technik zu überbieten.

Spektrum: Wie ist denn Ihre Position?

Birnbacher: Ich neige eher dem Lager der so genannten Transhumanisten zu, dem Philosophen wie Jonathan Glover, Ethikprofessor am King´s College in London, angehören. Sie erheben gegen verbessernde Eingriffe keine prinzipiellen Einwände. Die Vorstellungen von Normalität und damit davon, was als therapeutisch und was als verbessernd gilt, sind kulturell und historisch variabel. Folglich können sie nicht als Grundlage für ein grundsätzliches ethisches Verdikt dienen. Allerdings erfordern verbessernde Eingriffe strengere Risikoabwägungen: Es dürfen nicht so viele Risiken eingegangen werden wie bei therapeutischen.

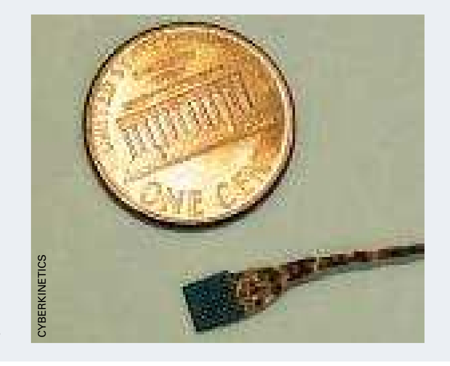
Spektrum: Elektronisches Doping des menschlichen Hirns ist also kein Tabu?

Birnbacher: Das Gehirn als das Organ, das eng mit unserer Persönlichkeit und unserem Bewusstsein verbunden ist, muss selbstverständlich als besonders sensibler Bereich gelten. Gleichwohl bleibt die Frage, ob wir unsere natürlichen Beschränkungen einfach hinnehmen sollten. Natürlichkeit kann meines Erachtens kein Kriterium sein. Es ist nicht einzusehen, warum unsere technischen Bemühungen vor dem Naturgegebenen prinzipiell Halt machen sollten. Problematisch sind die möglichen sozialen Konsequenzen. Wenn Techniken zum Hochtunen des Gehirns allgemein zur Verfügung stehen, besteht die Gefahr der Diskriminierung zwischen solchen, die sie sich leisten können und damit persönliche Vorteile erringen, und dem – plakativ gesprochen – dumm bleibenden Rest.

Spektrum: Nun meint ja Marvin Minsky, ein Vorkämpfer der Künstlichen Intelligenz, dass die »Missgeburt« Mensch auf lange Sicht von »Cyborgs« ersetzt werden sollte. Sehen Sie das ebenso?

Birnbacher: Ich halte nichts von Minskys reichlich utopischen Visionen. Vielmehr sehe ich das Problem, dass eine technische Steigerung der intellektuellen Grundausstattung des Menschen unser Selbstbild grundlegend wandeln und neue normative Zwänge schaffen wird. Dann müssen wir nicht mehr nur alle gebildeter, informierter und sozial kompetenter sein, um am gesellschaftlichen Leben partizipieren zu können, sondern auch über die geeigneten leistungssteigernden Prothesen verfügen. In gewisser Weise ist dieser Prozess übrigens längst im Gange. Es gibt heute schon Situationen, in denen man etwa ohne Mobiltelefon ziemlich dumm dasteht.

Klein, aber eine Hoffnung für Querschnittsgelähmte: der Gehirnchip der Firma Cyberkinetics



CYBERKINETICS

Spektrum: Können die Geisteswissenschaften gegensteuern?

Birnbacher: Durchaus. In vielen visionären Entwürfen bleibt die Dimension der sozialen und kulturellen Implikationen ja vollständig ausgeblendet. Kaum jemand fragt, wie sich unsere Umgangsweisen ändern werden. Hier liegt eine große Aufgabe für die Geisteswissenschaften. So kann uns etwa die Geschichtsforschung darüber belehren, dass unser Selbstbild nicht statisch ist. Es hängt ganz entscheidend auch vom wissenschaftlich-technischen Fortschritt ab, also von dem, was wir über uns selbst wissen und was wir können. Die großen Kränkungen des Menschen durch die kopernikanische Revolution, die Evolutionstheorie, die Psychoanalyse oder die Soziobiologie haben jeweils zu einer gewandelten Selbstwahrnehmung beigetragen. Deshalb wäre es kurzsichtig, jede Änderung des Menschenbilds im Gefolge wissenschaftlich-technischer Entwicklungen bereits als solche abzulehnen. Der technische Fortschritt bringt neue Möglichkeiten des Menschseins mit sich: kreative, produktive, aber natürlich auch destruktive.

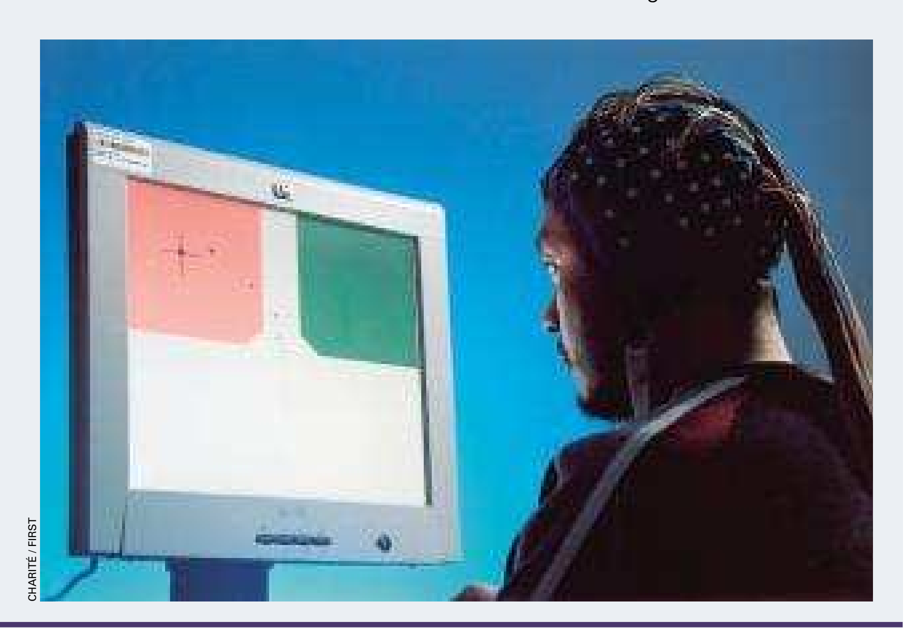
Spektrum: Wir sehen also keiner unmenschlichen Zukunft entgegen?

Birnbacher: Die Gegenwart ist zwar schon unmenschlich genug, aber nicht durch Technik, sondern durch Atavismen wie Völkermord und Hass. Auch wenn technische Errungenschaften dazu beitragen, die Folgen zu verschlimmern – der Auslöser sind archaische Impulse.

Die Fragen stellte **Gerhard Samulat**.

Vom Hirn zum Cursor

Beim Brain Computer Interface der Berliner Wissenschaftler registriert eine Haube auf dem Kopf des Probanden an 128 Punkten das hirnelektrische Potential. Aus diesen Daten extrahiert der Computer einerseits einen frühen, noch unspezifischen Bewegungsimpuls und setzt ihn in eine Cursorbewegung nach oben um. Andererseits ermittelt das System auch, ob die für den linken oder rechten Zeigefinger zuständige Motorregion aktiv wird. Die betreffende Information stellt es als Horizontalbewegung des Cursors dar. Dieser muss folglich am Ende in einem der beiden farbigen Felder landen (rotes Fadenkreuz), damit die Bewegung als erkannt gilt. Auf dem Bildschirm ist sein Weg in Schritten von vierzig Millisekunden gezeigt (Folge von Punkten). Da der allgemeine Bewegungsimpuls dem zielgerichteten vorausgeht, bewegt sich der Cursor zunächst hauptsächlich nach oben, bevor er zur Seite abbiegt.



CHARITÉ / FIRST

▷ bracht werden. Mit Hilfe eines Elektroenzephalogramms (EEG) lesen die Forscher die nur wenige millionstel Volt starken hirnelektrischen Bereitschaftspotenziale der Probanden ab.

Lauschangriff auf die Gedanken

Die Impulse sind zwar sehr viel schwächer, als wenn man sie direkt vom Denkorgan abgreift. Doch dafür erfasst die Haube gleichzeitig die Signale von vielen verschiedenen Hirnregionen. Das ist sinnvoll, weil Gedanken ja gewöhnlich nicht nur an einer Stelle entstehen. Auch an einer einfach klingenden Aufgabe wie der, einen Arm zu bewegen, wirken diverse Gruppen unserer komplex vernetzten grauen Zellen mit.

Die abgegriffenen EEG-Signale werden verstärkt und an einen Computer zur Weiterverarbeitung und Interpretation übermittelt. Auf der jüngsten CeBIT in Hannover zeigten die Forscher stolz ihren ersten Erfolg: Das System kann beispielsweise erkennen, ob die angeschlossene Person beabsichtigt, den rechten oder den linken Zeigefinger zu bewegen.

Im Unterschied zum amerikanischen Projekt und zu anderen nicht-invasiven Ansätzen müssen die Probanden nicht erst langwierig trainieren, ihre Hirnströme zu kontrollieren. Hier lernt vielmehr der Computer. Dazu tippt die Versuchsperson beispielsweise abwechselnd mit dem linken oder rechten Zeigefinger auf eine Tastatur. Die von den Berliner Spezialisten entwickelte Software trennt und interpretiert das zugehörige neurophysiologische Signal aus dem diffusen Informationsgemisch.

»Es ist ähnlich wie bei einer Cocktailparty«, erläutert Müller. »Dort muss man ja auch erst aus zahlreichen Stimmen diejenige seines Gesprächspartners herausfiltern, um sich mit ihm unterhalten zu können.« Schon nach wenigen Minuten braucht der Proband die Bewegung dann nicht mehr wirklich auszuführen – er muss sie sich nur noch vorstellen, damit der Computer sie erkennt.

Die Forscher belauschen das Gehirn dabei auf zwei verschiedenen Ebenen der Befehlshierarchie. Zum einen ermitteln sie, ob die motorische Hirnrinde an der Stelle aktiv wird, die für das Krümmen des jeweiligen Fingers zuständig ist. Das betreffende Signal wird in eine Bewegung des Cursors nach links oder rechts umgesetzt. Allerdings hat sich dieser Messwert allein noch nicht als zuverlässig genug erwiesen. Deshalb registrieren die Forscher zusätzlich die Aktivität einer höheren Einsatzzentrale im Gehirn.

Hier wird der spätere Befehl vorbereitet und dabei ein zunächst noch unspezifischer Bewegungsimpuls erzeugt: Das Gehirn beschließt gleichsam, eine Bewegung einzuleiten, weiß aber noch nicht welche. Auch diesen allgemeinen Impuls entnimmt der Computer dem EEG und setzt ihn in eine Cursor-Bewegung nach oben um.

Zwei Bereiche oben am Bildschirm – der eine links und der andere rechts – dienen entsprechend als Zielfelder: Wenn der Cursor dort landet, gilt die Bewegung als erkannt. Dabei erreichen die Forscher eine beachtliche Zuverlässigkeit. »Bei einigen Probanden lässt sich mit der Software die geplante Bewegung mit einer Sicherheit von 97 Prozent vorhersagen«, erklärt Müller. Der Algorithmus kann auf diese Weise bis zu fünfzig Entscheidungen pro Minute in technische Steuerungssignale umsetzen.

Nachdem die Forscher das neue Verfahren bisher nur an gesunden Freiwilligen getestet haben, wollen sie es noch in diesem Jahr auch an Menschen mit amputierten Extremitäten erproben. Im Erfolgsfall eröffnet sich so auch völlig Gelähmten die Möglichkeit, zumindest Ja/Nein-Anworten zu geben. Auf diese Weise können sie beispielsweise in mehreren Schritten aus sukzessive sich halbierenden Listen schließlich einzelne Buchstaben auswählen. Sich damit mitzuteilen oder gar Briefe zu schreiben, ist zwar mühsam, aber doch besser als nichts. Außerdem wollen die Berliner Forscher auch nicht auf dieser Stufe stehen bleiben. ◁

Gerhard Samulat ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

QUERSCHNITTSLÄHMUNG

Stopp dem verhängnisvollen Zelltod

Statt bei Querschnittslähmung die zerstörten Nervenbahnen zum Nachwachsen anzuregen, wollen Forscher schon den Untergang der Neuronen mit Antikörpern verhüten. Bei Mäusen hatten sie Erfolg.

Von Patrick Hollstein

Bis zu eine Milliarde Zellen in unserem Körper begehen täglich Selbstmord – Forscher sprechen von Apoptose. Funktionslose, infizierte oder entartete Zellen ziehen sich auf diese Weise selbst aus dem Verkehr. Ohne Apoptose gäbe es keine Organbildung, keine Erneuerung von Gewebe und keine funktionierende Immunabwehr. Als Auslöser können verschiedene Stimuli innerhalb oder außerhalb der Zelle wirken. Manchmal setzt auch das Fehlen von wichtigen Reizen bereits das Selbstmordprogramm in Gang.

Im Allgemeinen dient die Apoptose dem Wohl des Gesamtorganismus; aber in seltenen Fällen kann sie Unheil anrichten. So kommt es bei Rückenmarksverletzungen häufig deshalb zur Querschnittslähmung, weil nicht nur lädierte Nervenzellen absterben, sondern auch unbeschädigte Nachbarn nachträglich in den Tod getrieben werden.

Wie Forscher schon vor mehreren Jahren nachgewiesen haben, treten im Umkreis der Läsionsstelle Schlüsselmoleküle der apoptotischen Kaskade auf – sowohl in Neuronen wie in Gewebe, das nicht primär der Reizleitung dient, sondern überwiegend unterstützende Funktion hat. Die so verursachten sekundären Schäden und Gewebszerstörungen tragen offensichtlich entscheidend dazu bei, dass die Nervenverbindung zum Gehirn komplett unterbrochen und wegen der begrenzten Regenerationsfähigkeit des zentralen Nervensystems auch nicht wieder hergestellt wird.

Hauptschuldiger dingfest gemacht

Wissenschaftler des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg konnten nun einen Hauptschuldigen an diesem fatalen Geschehen ausfindig machen. Er ist unter den Namen CD95-, Fas- oder APO-1-Ligand schon länger bekannt. Bindet sich dieses Signalmolekül an den Rezeptor CD95 in der Zellmembran, wird dieser aktiviert. Eine intrazelluläre Kaskade kommt in Gang, in deren Verlauf das Zytoplasma schrumpft und die Erbsubstanz im Zellkern zerstückelt wird. Schließlich schnüren sich so genannte apoptotische Körperchen ab: Die Zelle löst sich auf.

Das Team um Ana Martin-Villalba demonstrierte die zentrale Rolle des CD95-Liganden, indem es bei Versuchen mit Mäusen das Todesmolekül mit neutralisierenden Antikörpern blockierte. Nach gezielter Verletzung des Rückenmarks erholten sich jene Tiere, die mit dem Immunglobulin behandelt worden waren, viel besser als ihre Artgenossen aus der Kontrollgruppe. In Gewebeschnitten zeigten sich neu auswachsende Nervenverbindungen – auch jenseits der Verletzungsstelle. In den genesenden Zellen ließ sich außerdem ein hoher Spiegel bestimmter Proteine nachweisen, die Indikatoren für Zellwachstum sind.

Zugleich schnitten die vorbehandelten Mäuse bei unterschiedlichen Geschicklichkeitstests innerhalb der nächsten Wochen deutlich besser ab als die Kontrolltiere. Dabei korrelierte ihre Beweglichkeit mit dem Ausmaß der Regeneration des Rückenmarks.

Die Antikörpergabe verhinderte auch das Absterben so genannter Oligodendrozyten, in dessen Folge die Nervenfasern (Axone) ihre schützende Myelinhülle verlieren. Sie sind dann nicht mehr im Stande, elektrische Signale rasch und effizient über größere Strecken weiterzuleiten. Ein Abbau der Myelinhülle – in diesem Fall allerdings als Folge einer Autoimmunreaktion – ist auch die Ursache der Lähmungserscheinungen bei der multiplen Sklerose.

Ursprünglich hielten die meisten Wissenschaftler ein anderes Signalmolekül der Apoptose, den Tumor-Nekrose-Faktor (TNF), für den mutmaßlichen Verursacher des verhängnisvollen Zelltods bei Rückenmarksverletzungen. Seine Blockade erwies sich in den Experimenten jedoch als kaum wirksam: Sie konnte den Zelluntergang und die Folgeschäden nicht wesentlich mindern.

Trotz des Erfolgs beurteilen die Heidelberger Forscher die mögliche Anwendung ihrer Erkenntnis beim Menschen vorerst zurückhaltend. Die Auswirkungen von Rückenmarksverletzungen seien sehr komplex und ließen sich wahrscheinlich nur mit einer Kombination unterschiedlicher Therapieverfahren positiv beeinflussen (siehe Kasten).

C. BARTHÉLÉMY UND C. E. HENDERSON

Bei einer Rückenmarksverletzung bilden umgebende Zellen vermehrt das Signalmolekül CD95L. Lagert es sich an den Rezeptor CD95, begeht die betreffende Zelle Selbstmord. Daher geht auch nicht direkt betroffenes Nervengewebe nachträglich zu Grunde (links). Mit einem Antikörper lässt sich das verhindern.

Strategien gegen Querschnittslähmung

Als einziges Arzneimittel für Patienten mit akuten Rückenmarksverletzungen ist bislang das Kortikoid Methylprednisolon zugelassen. Es soll die Entzündungsreaktion nach der Läsion eindämmen.

Es gibt jedoch konkrete Ansätze für weiter reichende Therapien. So wurden in der Myelinhülle der Neuronen Stoffe nachgewiesen, die das Nervenwachstum unterdrücken. Seitdem arbeiten Forscher an Strategien, diese Suppression aufzuheben. Eine Möglichkeit dazu bieten Antikörper, die das wachstumshemmende Signalmolekül Nogo neutralisieren. Sie stehen, nachdem die Erprobung an Affen ermutigend verlief, vor ersten klinischen Tests. Ferner wurde ein Peptid identifiziert, das sich spezifisch an den Nogo-Rezeptor heftet und dessen Einfluss unterdrückt. Schließlich stehen mit den so genannten Rho-Antagonisten sowie dem Botenstoff cAMP und seinen Abkömmlingen experimentell einsetzbare Substanzen zur Verfügung, welche die durch Nogo vermittelte intrazelluläre Signalkaskade blockieren.

Ein anderer Ansatz ist, das zerstörte Nervengewebe mit Wachstumsfaktoren, so genannten Neurotrophinen, zur Regeneration anzuregen. Ferner gibt es Versuche, Vorläuferzellen zu implantieren, die sich zu Nerven- und Gliazellen differenzieren können. Dazu gehören körpereigene Stammzellen oder embryonales Gewebe. Letzteres birgt jedoch – abgesehen von den ethischen Bedenken – das Risiko immunologischer Reaktionen, was eine dauerhafte medikamentöse Immunsuppression erfordert. Trotzdem laufen in Australien und China erste klinische Versuche. Auch zur protektiven Wirkung des Blutaufbaupräparats Erythropoietin gibt es Studien am Menschen.

Ein zentrales Problem bei der Regeneration von Nervenfasern nach Rückenmarksverletzungen ist die Narbenbildung. Forscher versuchen deshalb, die an der Kollagensynthese beteiligten Enzyme zu hemmen oder vorhandenes Narbengewebe aufzulösen. Dafür eignet sich zum Beispiel das Bakterienenzym Chondroitinase ABC. In wieder anderen Projekten setzen die Forscher physiologisch »gepolsterte« Brücken oder Tunnel ein, die den Nervenfasern bei der Überwindung des Narbengewebes helfen sollen.

Befürchtungen, dass eine unkontrollierte Vernetzung neu gebildeter Neuronen Nebenwirkungen wie Phantomschmerzen hervorrufen könnte, haben sich bislang nicht bestätigt. Obwohl die meisten seriösen Forscher davon ausgehen, dass es eine vollständige Heilung für Querschnittsgelähmte in absehbarer Zeit nicht geben wird, könnte auch eine teilweise Remission die Lebensqualität der Betroffenen erheblich verbessern.

Eine Schwierigkeit besteht zudem darin, die neutralisierenden Antikörper rechtzeitig in die geschädigte Region zu bringen. Deshalb hatten Martin-Villalba und ihre Mitarbeiter die Versuchstiere schon vorab mit den Immunglobulinen behandelt. Im klinischen Alltag wäre das natürlich nicht möglich. Daneben birgt die Methode potenzielle Risiken. So werden auch irreparabel geschädigte Zellen, die ihre Funktion eingebüßt haben, am Leben gehalten. Außerdem kann die längerfristige Hemmung des CD95-Signalwegs Wachstumsprozesse stören.

Dennoch halten die Forscher ihre Methode im Rahmen einer Kombinationstherapie für viel versprechend. Wegen der vorübergehenden Ausschaltung des CD95-Liganden würden unbeschädigte Nervenzellen die unsinnigen Befehle zum Selbstmord ignorieren und überleben, bis wieder ein zuträgliches Milieu herrscht. Günstig ist auch die Schutzwirkung auf die Oligodendrozyten. Der Erhalt der Myelinhüllen kommt nicht nur intakt gebliebenen Axonen zugute, sondern hilft zugleich geschädigten Fasern, sich zu regenerieren und ihre Funktionsfähigkeit wieder zu erlangen.

Auch wenn sich also derzeit noch keine konkreten Versprechungen machen lassen, so weckt die Arbeit der Heidelberger Forscher doch neue Hoffnung. Vielleicht bildet sie ein wesentliches Element einer künftigen Behandlungsmethode, mit der sich verhindern lässt, dass eine Rückenmarksverletzung fast zwangsläufig eine Querschnittslähmung nach sich zieht. ◁

Patrick Hollstein ist diplomierter Pharmazeut und freier Journalist in Berlin.

NACHGEHAKT

Hawkings Bart

Der bekannte Physiker hat mit viel Publicity einen Irrtum eingestanden.

Sind Schwarze Löcher behaart? Oder gleichen diese geheimnisvollen Risse der Raumzeit kosmischen Glatzen, wie Stephen Hawking vor Jahren in seinem »Keine-Haare-Theorem« postulierte? Der englische Star-Theoretiker drückte mit diesem Bild seine Überzeugung aus, wonach ein Schwarzes Loch keinerlei Information über seine individuelle Geschichte preisgeben, sondern verschlinge spur- und unterschiedslos alles, was ihm zu nahe kommt. Nach außen präsentiert es somit außer ein bisschen nichtssagender Hawking-Strahlung nur seinen so genannten Ereignishorizont – sozusagen einen perfekten Kahlkopf, der ebenso gut einem arabischen Säugling wie einem alten Iren gehören könnte.

Nach einem Bonmot des österreichischen Polemikers Karl Kraus heißt ein Feuilleton schreiben auf einer Glatze Locken drehen. Insofern war Ende Juli die Meldung hochwillkommen, Hawking widerrufe sein Keine-Haare-Theorem und beharre nun im Gegenteil auf haarigen Schwarzen Löchern. Diese Information entwich dem wie jedes Jahr gähnenden Sommerloch, als habe Hawking beweisen wollen, dass auch ein alles Naturwissenschaftliche verschlingender Medienereignishorizont immer wieder kleine Überraschungen ausspuckt.

Hawkings Ankündigung verschaffte ihm sofort einen spektakulären Auftritt auf der Internationalen Konferenz über Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitation in Dublin. Sein dort skizziertes Argument läuft auf einen Versuch hinaus, die kausale und informationelle Kohärenz des Kosmos trotz Schwarzer Löcher zu gewährleisten.

Die Art und Weise, wie zwei weit voneinander entfernte Regionen des Alls physikalisch-kausal miteinander verbunden sind, darf gemäß diesem Argument nicht davon abhängen, welchen Verbindungsweg man wählt – ob er durch »topologisch triviale« oder mit Schwarzen Löchern gepflasterte Raumgebiete führt. Damit verwirft Hawking, wie er spitzbübisch anmerkte, die von ihm früher aufgebrachte und bei Science-Fiction-Fans beliebte Idee, Schwarze Löcher seien Falltüren, die in parallele Universen führten.

Mit diesem Coup hat Hawking das Kunststück fertig gebracht, sich zur Meinung der meisten Physiker zu bekehren und dies als große Sensation zu verkaufen. Seine öffentliche Ankündigung, er könne nun als Erster stringent beweisen, warum Schwarze Löcher keine Informationsgräber sind, stößt hingegen allgemein auf Skepsis.

Hawkings Handwerkszeug ist im Grunde seit den 1970er Jahren, als er in einer epochalen Arbeit die nach ihm benannte Quantenstrahlung Schwarzer Löcher herleitete, gleich geblieben: ein »semiklassischer« Theorie-Mix aus Einstein'scher Gravitationstheorie plus Quanteneffekten.

Das ist aber kein Ersatz für eine echte Theorie der Quantengravitation, die es noch nicht gibt. Erst sie wird, ob in Gestalt einer Stringtheorie oder als Loop-Quantengravitation, eines Tages wirklich beschreiben können, was im Innern eines Schwarzen Lochs vor sich geht. Bis dahin ist das Hin und Her um Hawkings Keine-Haare-Theorem ein wenig wie der sprichwörtliche Streit um des Kaisers Bart.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Macht sogar noch einen Widerruf zum Medienereignis: Physikerstar Stephen Hawking

Michael Springer

Der Autor ist ständiger freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

ARCHÄOLOGIE

Wer schuf die ersten Kunstwerke der Menschheit?

Archäologen und Anthropologen hatten bisher wenig Zweifel, dass die ältesten bekannten figürlichen Darstellungen vom anatomisch modernen Menschen stammen. Doch diese Überzeugung gerät nun ins Wanken (siehe auch das Interview auf S. 22).

Von Thomas Brock

Die ersten Bildhauer der Welt lebten offenbar auf der schwäbischen Alb. Vor ungefähr 30 000 bis 36 000 Jahren schnitzten dort Eiszeitmenschen mit erstaunlicher Präzision aus Mammutzähnen Abbilder von Wollnashörnern, Wasservögeln und Wildpferden. Eine eigenartige, aufrecht stehende Figur (Bild oben rechts) – halb Löwe, halb Mensch – deutet zugleich auf religiös-mythologische Vorstellungen hin. Und eine der ältesten Knochenflöten beweist, dass die Meister auch musikalisch feinsinnig waren.

Rund zwanzig Elfenbeinplastiken förderten Archäologen in mehr als siebzig Jahren aus den Höhlen der schwäbischen Alb zu Tage. Die Figuren sind der Höhepunkt einer erstaunlich innovativen Epoche. Neue Techniken zur Steinbearbeitung, intensiver Gebrauch von Schmuck, Verarbeitung von Knochen und Geweihen sowie weite Transportwege für Rohmaterialien gelten als die Kennzeichen dieser Zeit, der die Archäologen nach der Höhle von Aurignac, dem ersten Hauptfundort solcher Kulturzeugnisse, den Namen Aurignacien gaben.

Lange waren sich die Altertumsforscher sicher, dass diese großen kulturellen Fortschritte dem anatomisch modernen Menschen *(Homo sapiens sapiens)* zuzuschreiben seien. Die Schlussfolgerung lag allzu nahe: Der moderne Mensch kam nach Europa, löste dort eine kulturelle Revolution aus und verdrängte den Neandertaler. Zwar gilt dieses simple Weltbild inzwischen als überholt. Doch viele halten den Neandertaler immer noch für kulturell unterbelichtet. Als feinsinnigen Ästheten mögen ihn sich auch in der Fachwelt bisher nur wenige vorstellen.

Freilich sind die Belege für die Urheberschaft des anatomisch modernen Menschen an den ersten Kulturzeugnissen in jüngster Zeit dahingeschwunden. Schließlich blieb als letzter Beweis für die alte Theorie nur der Schädel eines *Homo sapiens sapiens,* den Gustav Riek im Jahre 1931 in der Vogelherdhöhle gefunden hatte – in der gleichen Schicht wie die Tierfiguren. Da der Ausgräber als zuverlässig galt, hegte niemand Zweifel an dem damaligen Fund.

Doch nun wurde auch diese letzte direkte Verbindung zwischen dem modernen Menschen und den ältesten Kunstwerken spektakulär zerissen. Im Juli stellten Nicholas J. Conard vom Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Tübingen und seine Kollegen die Ergebnisse einer Radiokarbondatierung der Skelettreste vor *(Nature, 8.7.2004, S. 198).* Sie sind ebenso sensationell wie vernichtend: Der anatomisch moderne Mensch aus der Vogelherdhöhle starb vor nicht einmal 5000 Jahren. Als Schnitzer der frühesten Kunstwerke scheidet er damit aus.

Pieter M. Grootes vom Kieler Institut für Isotopenforschung untersuchte sechs Knochen mit der modernen, hochpräzisen Variante der Radiokarbonmethode, die ein Beschleuniger-Massenspektrometer benutzt. Dabei kam er auf eine Altersspanne von 3900 bis 5000 Jahren.

Der Radiochemiker ist sich einer möglichen Fehlerquelle durchaus bewusst: Die 70 Jahre alten Konservierungsmittel in dem Schädel könnten das Ergebnis verfälschen. Doch er versichert: »Die untersuchten Knochen müssten schon zur Hälfte aus Konservierungsstoffen bestehen, um einen Messfehler von mehr als 20 000 Jahren zu produzieren.« Und das ist auszuschließen.

Wegfall eines Schlüsselfundes

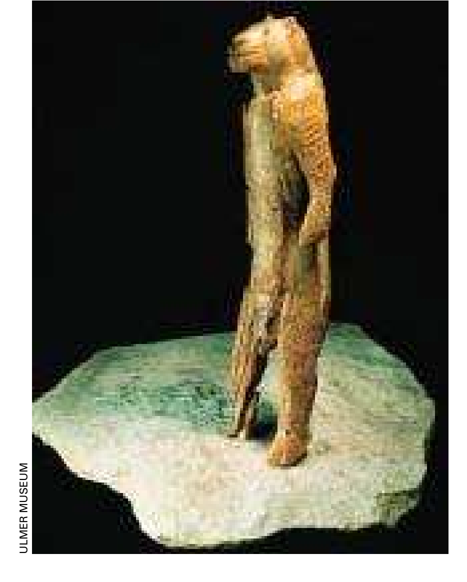
»Mit der Datierung fällt ein Schlüsselfund weg, von dem das Weltbild über die ersten modernen Menschen in Europa und die Anfänge der Kunst abhing«, gesteht Conard. Der Schädel vom Vogelherd ist nämlich nicht der erste, dessen Alter lange Zeit überschätzt wurde. So erwies sich auch der Cro-Magnon-Mensch aus der Dordogne, das Leitfossil des Aurignacien, als nur etwa 27 700 Jahre alt. Er fällt damit in eine spätere Kulturepoche: das so genannte Gravettien. Desgleichen kommt der Schädel vom Hahnhöfersand, ursprünglich auf 36 000 Jahre datiert, nach Radiokarbonanalysen nur noch auf 9500 Jahre. Für die frühesten Kunstwerke lebten diese modernen Menschen eindeutig zu spät.

Damit sind Skelettreste des *Homo sapiens sapiens* aus der Zeit vor 30 000 Jahren rar geworden. Alles Augenmerk rich-



HILDE JENSEN / UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Dieser Schädel eines anatomisch modernen Menschen lag in derselben Schicht wie die Tierfiguren in der Vogelherdhöhle. Eine neue Datierung ergab jedoch, dass er nur 5000 Jahre alt ist.



ULMER MUSEUM

Mehr als 30 000 Jahre altes Kulturzeugnis: der Löwenmensch aus der Vogelherdhöhle

tet sich nun auf die wenigen Exemplare aus Osteuropa. Die Fossilien aus dem tschechischen Mladeč, die zusammen mit typischen Aurignacien-Geräten angetroffen wurden, sind nicht direkt datiert. Lediglich für die Schichten darüber gibt es neuere Radiokarbonmessungen, welche ein Alter von 34 000 bis 35 000 Jahren ergaben. Die Menschenknochen müssten demnach älter sein; doch solange sie nicht direkt datiert sind, droht ihnen ein ähnliches Schicksal wie dem Schädel vom Vogelherd.

Der Unterkiefer des *Homo sapiens sapiens*, der 2002 in der Karsthöhle »Pestera cu Oase« in Rumänien gefunden wurde, ist zwar mit Sicherheit ungefähr 35 000 Jahre alt, aber hier gibt es keine archäologischen Beifunde. Welche Geräte und Techniken der zugehörige Mensch nutzte, bleibt somit unklar.

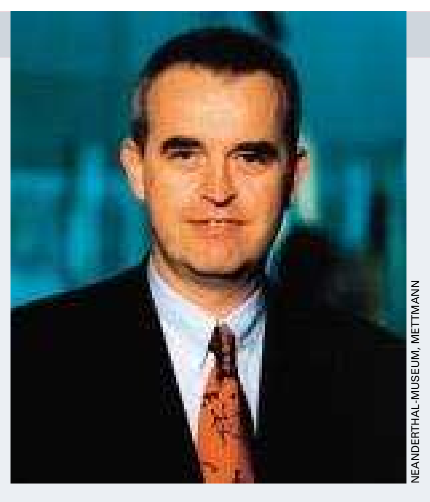
Nach der alten Theorie von Conard drang der *Homo sapiens sapiens* über den Donau-Korridor nach Europa vor und entfaltete in Schwaben seine Kunstfertigkeit. Von hier wären die entscheidenden Impulse für die kulturelle Revolution ausgegangen. Doch nun scheint alles offen: Niemand kann mehr sicher sagen, wann der moderne Mensch Mitteleuropa erreichte oder wer die Aurignacien-Kultur und die früheste Kunst schuf. Conard verweist selbst auf die radikale Gegenthese: »Es besteht die Möglichkeit, dass der Neandertaler die Kunstobjekte vom Vogelherd geschnitzt hat.« Beweisen lässt sich das freilich (noch) nicht. ◁

Thomas Brock ist freier Journalist und Museumspädagoge am Hamburger Museum für Archäologie.

INTERVIEW

»Der Neandertaler war durchaus innovativ«

Gerd Christian Weniger, Experte für Ur- und Frühgeschichte des Menschen, äußert sich zu den neu aufgetauchten Fragen über den Ursprung der kulturellen Revolution in Europa vor 35000 Jahren (siehe Beitrag auf S. 20).



NEANDERTHAL-MUSEUM, METTMANN

Gerd-Christian Weniger ist Direktor des Neanderthal-Museums in Mettmann und außerplanmäßiger Professor am Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Köln.

Spektrum der Wissenschaft: Haben die Datierungsergebnisse vom Vogelherd Sie überrascht?

Gerd-Christian Weniger: Nicht sehr. Es sind ja schon andere Schlüsselfunde aus der Diskussion um die Entstehung des Aurignacien und den Anfang der Kunst ausgeschieden. Diese Tendenz hat mit der Datierung des Schädels vom Vogelherd nun einen Höhepunkt erreicht.

Spektrum: Was bedeutet das geringe Alter des Schädels für die Kulturgeschichte der Menschheit?

Weniger: Das alte Weltbild, wonach der anatomisch moderne Mensch in Europa eine kulturelle Revolution ausgelöst hätte, kann so nicht mehr stehen bleiben. Was wir über den Zeitraum vor 30000 bis 40000 Jahren gedacht hatten, ist völlig ins Wanken geraten. Wir wissen nicht, wer die ersten Kunstwerke geschaffen hat, wir wissen nicht, wer die neuen Steingeräte erfunden hat, und wir wissen nicht, ob und wie Neandertaler und moderner Mensch in Europa zusammengelebt haben.

Spektrum: Was weiß man denn überhaupt?

Weniger: Wir wissen, dass in dieser Epoche eine unglaubliche kulturelle Dynamik herrschte und sich ganz entscheidende Entwicklungen vollzogen, wie sie an den Kunstwerken von der schwäbischen Alb offenbar werden. Wir wissen auch, dass das Aurignacien nicht so monolithisch ist, wie man das noch vor zehn Jahren gedacht hatte. Es gibt auch innerhalb dieses Technokomplexes einen Entwicklungsprozess.

Unser Problem ist, dass nun ein Vakuum entstanden ist. Wir haben noch keine überzeugenden wissenschaftlichen Modelle, um die Vorgänge beim Übergang zwischen dem Mittelpaläolithikum und dem Jungpaläolithikum zu erklären. Wir bemühen uns aber, nicht so einfache Antworten wie früher zu geben, als Veränderungen stets mit einer großen Einwanderungswelle erklärt wurden.

Spektrum: War vielleicht doch der Neandertaler Motor für die kulturellen Fortschritte dieser Epoche?

Weniger: Das wäre theoretisch denkbar. Aber das wird zum aktuellen Zeitpunkt keiner der Kollegen ernsthaft behaupten. Da will sich niemand den Mund verbrennen.

Spektrum: Gäbe es Argumente für eine solche Behauptung?

Weniger: Der Neandertaler hat schon im Mittelpaläolithikum mit Farben gearbeitet und erste Knochenwerkzeuge hergestellt. Er war also durchaus innovativ. Aus den so genannten Übergangsindustrien wie dem französischen Châtelperronien vor ungefähr 36 000 Jahren kennen wir Schmuck aus Neandertaler-Bestattungen und Steingeräte, wie sie uns später im Aurignacien begegnen. Aber Objekte der Kleinkunst sind in all der Zeit, als der Neandertaler der einzige Vertreter des Menschen in Europa war, nicht belegt.

Spektrum: Wie sicher ist denn überhaupt, dass Neandertaler das Châtelperronien geschaffen haben?

Weniger: Es gab kürzlich von französischen Kollegen mahnende Worte, dass der Zusammenhang zwischen Neandertaler-Fossilien und den Châtelperronien-Objekten keineswegs eindeutig sei. Da müssen wir abwarten, was die Forschungen in Saint Cesaire und Arcy-sur-Cure weiter erbringen.

Spektrum: Lassen neue Klimadaten den Übergang zwischen Mittel- und Jungpaläolithikum in einem anderen Licht erscheinen?

Weniger: Ganz klar. Wir erkennen, dass von 45000 bis 24000 Jahren vor heute ein enorm variables Klima herrschte. Menschen konnten den Wechsel zwischen Kalt- und Warmphasen im Laufe ihres Lebens am eigenen Leib erfahren. Für die jägerischen Populationen in Europa war das dramatisch. Es zwang sie zu enormen Anpassungsleistungen und zu erheblicher Mobilität. Diese raschen Klimawechsel könnten eine Erklärung für die ungewöhnliche kulturelle Dynamik sein.

Spektrum: Gibt es denn noch Forscher, die auf der kulturellen Rückständigkeit des Neandertalers beharren?

Weniger: Es gibt sie, aber sie befinden sich eindeutig auf dem Rückzug.

Spektrum: Sind sich Neandertaler und anatomisch moderner Mensch denn begegnet?

Weniger: Die Meinungen gehen da weit auseinander. Wir bewegen uns bei dieser Frage auf sehr dünnem Eis, wie wir inzwischen wissen. Ich persönlich glaube, dass dies geschehen ist. Die Hinweise auf eine Überlappung zwischen den beiden Menschenformen sind doch sehr deutlich. Die jüngsten Neandertalerspuren sind nur 26000 Jahre alt. Trotz der geringen Populationsdichte wäre es ein Wunder, wenn es nicht zu Kontakten gekommen wäre.

Spektrum: Laut DNA-Analysen können Neandertaler aber nicht unsere Vorfahren gewesen sein.

Weniger: Die Kollegen aus der Paläogenetik schließen ja nicht aus, dass der Neandertaler einen Beitrag zum modernen Genpool geleistet hat. Die Frage ist nur, wie groß dieser war. Das könnten durchaus 25 Prozent gewesen sein.

Die Fragen stellte **Thomas Brock**.

MEDIZIN

DNA-Computer zur Krebsdiagnose und -therapie

Ein raffiniert konstruiertes DNA-Molekül kann vier Indikatoren für Prostatakrebs testen und bei positivem Ergebnis eine tumorhemmende Substanz freisetzen.

Von Michael Groß

Die Erbsubstanz DNA hat sich als ungemein vielseitiges Molekül entpuppt. So erwies sich, dass sie nicht nur als Basis für Computer, sondern auch als Baumaterial für geometrische Körper sowie als Kabel zum Transport elektrischer Ladungen taugt (Spektrum der Wissenschaft 8/1995, S. 16). Sah das alles zunächst noch mehr nach Spielerei aus, so zeigten sich schon bald ernsthafte Anwendungen. So ermöglicht die Leitfähigkeit der Doppelhelix die Konstruktion hochempfindlicher Gen-Sensoren.

Nun haben Forscher um Ehud Shapiro vom Weizmann-Institut in Rehovot (Israel) bewiesen, dass ein verblüffend einfacher DNA-Computer sogar medizinische Aufgaben bewältigen kann *(Nature, Bd. 429, S. 423)*. In der Demoversion prüft er vier gängige Indikatoren für Prostatakrebs und setzt, sofern alle Tests positiv sind, einen Gen-Schnipsel zur Behandlung der Krankheit frei.

Es grenzt schon fast an Zauberei, aber für all diese Funktionen genügt letztlich ein einzelnes, sinnreich konstruiertes DNA-Molekül. Auf Grund der Abfolge seiner Bausteine (Basen) biegt es sich in der Mitte zurück und bildet eine »Haarnadel-Schleife«. Genau in dem Knick liegt das Medikament, nämlich die Gensequenz, welche den Prostatakrebs bekämpft, sofern er diagnostiziert wird. Doch die zur Doppelhelix verdrillten Bügel der Haarnadel halten so fest zusammen, dass sich die Schleife bei Körpertemperatur nicht von selbst öffnen kann.

Raffinierte genetische Schlösser

Damit sie bei positivem Testergebnis aufspringt, sind vier genetische »Schlösser« eingebaut, die sich jeweils mit einer bestimmten Gensequenz aufschließen lassen (siehe Kasten auf S. 24). Nach dem Entriegeln wird das Schloss mitsamt den benachbarten Bügelstücken entfernt – bis am Ende die therapeutische DNA in der Schleife frei vorliegt und sich ungehindert entfalten kann.

Beim Test auf Prostatakrebs lautete die erste Schlüsselfrage: Ist ein Gen namens PPAB2B nicht so aktiv wie normal? In diesem Fall werden weniger Abschriften – Boten-RNA-Moleküle – von ihm erzeugt. Dies kann man feststellen, indem man ein DNA-Molekül zugibt, das genau diese Abschriften erkennt und sich daran heftet, weil es »komplementär« dazu ist. Liegt zu wenig Boten-RNA vor, bleibt ein Teil der für die normale Menge dosierten Sensor-DNA übrig und dient dann als Schlüssel für das erste Schloss.

Dieses Schloss besteht aus einem überstehenden Einzelstrang am Ende der Haarnadel. Er hat genau die zum Sensor-DNA-Molekül passende, also komplementäre Basensequenz, sodass dieses sich an ihn anlagert und einen neuen Doppelhelix-Abschnitt bildet. Der aber wirkt nun als Erkennungsstelle für ein so genanntes Restriktionsenzym, das als hochspezifische genetische Schere fungiert. Es durchtrennt die beiden DNA-Stränge an verschiedenen, aber genau definierten Stellen: den einen um neunzehn und den anderen um neun Basen gegenüber der Bindungsstelle versetzt. So wird das erste Schloss entfernt und zugleich ein neues überstehendes Ende erzeugt, das nunmehr das zweite Schloss bildet.

Dieses lässt sich nach dem gleichen Prinzip öffnen. Beim dritten Riegel ist dagegen noch etwas mehr Raffinesse verlangt. Hier prüft der Molekülcomputer die verstärkte Aktivität des Gens PIM1. Dazu muss außer der normalen Menge an einzelsträngiger Sonden-DNA noch ein Überschuss in der doppelsträngigen, gepaarten Form zugefügt werden. Wenn die gesuchte Boten-RNA dann in höherer Konzentration als üblich vorliegt, entzieht sie dem Paar den einen Strang, sodass der andere als Schlüssel für das PIM1-Schloss dienen kann. ▷

Der DNA-Doktor in Aktion

Das Arbeitsprinzip des DNA-Computers zur Diagnose und Therapie von Prostatakrebs ist hier für eine vereinfachte Version mit nur zwei Schlössern gezeigt. Sie besteht aus einem DNA-Molekül in Form einer Haarnadel – mit zwei gepaarten Bügeln, von denen einer etwas übersteht. Die Schleife stellt ein Medikament dar, das durch die Anordnung unzugänglich ist. Die Schlösser befinden sich nebeneinander auf den Bügeln (a). Als Schlüssel dienen kurze DNA-Stücke, die zur RNA-Abschrift (Boten-RNA) eines Gens passen, dessen verringerte Aktivität auf Prostatakrebs hindeutet. Normalerweise würde die Boten-RNA den Schlüssel komplett binden und aus dem Verkehr ziehen (b). Gibt es jedoch zu wenig davon, weil das zugehörige Gen nicht aktiv genug ist, bleiben Schlüsselmoleküle übrig. Sie lagern sich dann an das überstehende Ende der Haarnadel an, zu dem sie teilweise komplementär sind (c). Dabei entsteht ein Doppelstrang, an dem ein Restriktionsenzym andocken kann.

Diese hochspezifische »Schere« durchtrennt die beiden DNA-Bügel an bestimmten Positionen: den einen um 19 und den anderen um neun Basen gegenüber der Bindungsstelle versetzt (d; hier sind es aus Platzgründen nur neun bzw. vier). So wird das erste Schloss entfernt und zugleich ein neues überstehendes Ende erzeugt, das als zweites Schloss fungiert. Daran kann sich der zweite Schlüssel anlagern (e). Er ermöglicht dem Restriktionsenzym, auch noch die verbliebenen Reste der Bügel abzuschneiden (f). Danach liegt das Medikament frei vor und kann seine Wirkung entfalten (g).

▷ Generell habe ich die Mechanismen etwas vereinfacht beschrieben. In Wirklichkeit ergriffen die Forscher in allen Fällen zusätzliche Maßnahmen, um ihr Schlüssel-Schloss-System genau zu justieren und gegen zufällige Konzentrationsschwankungen abzusichern. Das Beste an dem Verfahren ist, dass der DNA-Computer nicht nur einfache Ja/Nein-Antworten liefern, sondern über die jeweils eingesetzten Substanzmengen der Vermittler- und Schlüssel-DNAs auch die Einhaltung oder Überschreitung definierter Schwellenwerte feststellen kann.

Nur ein Manko hat das System: Es ist noch nicht einsatzreif. Bisher haben es die israelischen Forscher lediglich im Reagenzglas getestet und dabei die für Prostata- und kleinzelligen Lungenkrebs typischen Molekülsorten künstlich vorgegeben. In beiden Fällen lieferte der Molekülcomputer zwar die korrekte Diagnose und setzte am Ende den vorgesehenen Wirkstoff frei. Das Verfahren auf ein Versuchstier und schließlich den Menschen anwendbar zu machen, bleibt aber noch eine gigantische Herausforderung. Dazu ist es nötig, sowohl die empfindliche DNA-Haarnadel unbeschadet an die richtige Stelle im Organismus zu bringen als auch die Sonden-Moleküle, die nicht nur in ihren Basensequenzen, sondern ebenso in ihrer relativen Häufigkeit wichtige Informationen tragen, vollzählig zum Einsatzort zu befördern.

Wenn diese Schwierigkeiten einmal überwunden sind, kommt allerdings der Vorzug der DNA wieder zum Tragen, der Forscher schon vor zehn Jahren zu ersten spielerischen Versuchen mit dem Erbmolekül animiert hatte. Mit Methoden wie der Polymerasekettenreaktion lassen sich beliebige DNA-Stränge im Prinzip grenzenlos vermehren. So ist es Gerald Joyce vom Scripps-Institut in La Jolla (Kalifornien) vor kurzem gelungen, DNA-Moleküle vom Fließband zu erzeugen, die sich von alleine zu geometrischen Figuren auffalten *(Nature, Bd. 427, S. 618)*. Sobald man die praktischen Probleme wie die Stabilisierung der Erbsubstanz an ihrem Einsatzort gelöst hat, sind der Fantasie so gut wie keine Grenzen mehr gesetzt. ◁

Michael Groß ist Biochemiker und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

Der ungewöhnliche Tod gewöhnlicher Sterne

In rund fünf Milliarden Jahren wird die Sonne in einem spektakulären Finale vergehen. So wie andere Sterne ihrer Größe wird sie sich in eines der schönsten Kunstwerke der Natur verwandeln: einen planetarischen Nebel.

Von Bruce Balick und Adam Frank

Die Glasbläserei von Dale Chihuly in Seattle liegt nur einen Steinwurf vom Astronomischen Institut der Universität von Washington entfernt. Chihuly ist berühmt für seine Glasskulpturen, deren glänzende fließende Formen an eine Unterwasserwelt erinnern. Strahlt man die Figuren in einem dunklen Raum an, so scheint das sich brechende Licht das Glas zum Leben zu erwecken: Gelbe Quallen und rote Tintenfische ziehen durch kobaltblaues Wasser, Tiefseealgen schaukeln in den Gezeiten, zwei rosa schillernde Muscheln umklammern sich, als wären sie im innigen Liebesakt versunken …

Astronomen aber verbinden Chihulys Glasskulpturen noch mit etwas anderem: Kaum ein weiteres uns bekanntes menschliches Werk vermag die überwältigende Schönheit von planetarischen Nebeln so eindrucksvoll zu illustrieren. Diese Gasschwaden im Weltraum werden von einem ausgebrannten Stern von innen erleuchtet. Strahlende Atome und Ionen lassen sie in verschiedenen Farben funkeln. Im Kontrast zur umgebenden Dunkelheit des Kosmos erscheinen sie wie Juwelen auf schwarzem Samt, und manche von ihnen offenbaren Formen oder eine Dynamik, die an lebendige Wesen erinnern. Forscher gaben ihnen Namen wie Ameise, Seestern oder Katzenauge. Die besten Fotografien dieser Himmelsobjekte, die vom Hubble-Weltraumteleskop stammen, gehören zu den eindrucksvollsten astronomischen Aufnahmen, die je gemacht wurden.

Ihren Namen haben planetarische Nebel einem Missverständnis zu verdanken. Der deutsch-englische Astronom William Herschel entdeckte vor gut zwei Jahrhunderten mit seinem Teleskop ausgefranste, wolkige Objekte am Himmel. Manche von ihnen erschienen rund, so wie der grünliche Planet Uranus, den Herschel 1781 entdeckt hatte. Deshalb vermutete er, diese Nebel seien gerade dabei, Planetensysteme um junge Sterne zu formen.

Der Name blieb erhalten, selbst als sich das genaue Gegenteil als richtig herausstellte: Planetarische Nebel bestehen aus Gas, das sterbende Sterne ins All schleuderten. Sie sind deshalb keine Analogie zur Vergangenheit unseres Sonnensystems, sondern sie offenbaren unser künftiges Schicksal: In ungefähr fünf Milliarden Jahren wird die Sonne ihr kosmisches Dasein in einer gewaltigen Eruption beenden und sich ebenfalls ▷

J. P. HARRINGTON, UNIVERSITÄT MARYLAND, K. J. BORKOWSKI, NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY, UND NASA

Das Katzenauge (NGC 6543) – ein 3000 Lichtjahre entfernter planetarischer Nebel im Sternbild Drache – weist eine äußerst komplexe Struktur auf. Trotz ihres Namens haben solche Nebel nichts mit Planeten zu tun. Sie sind vielmehr Gasmassen, die einst die äußeren Schichten ihres nun deutlich geschrumpften Zentralsterns gebildet haben.



▷ mit einem planetarischen Nebel umgeben (siehe Kasten auf S. 32).

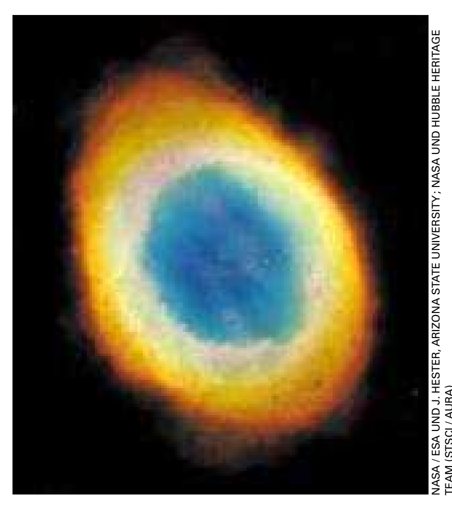
Doch wie jedes Kunstwerk sind planetarische Nebel nicht einfach nur schön anzuschauen. Sie fordern unser Weltbild und unsere Wahrnehmungsfähigkeit heraus. Insbesondere leiten sich aus ihnen zahlreiche Fragen an die Theorie der Sternentwicklung ab. An und für sich ist das Modell, das die Lebensgeschichte von Sternen beschreibt, recht ausgereift, und es bildet eine der Grundlagen, auf denen unser Verständnis des Kosmos beruht. Und doch vermag diese Theorie kaum die komplexen Strukturen von planetarischen Nebeln zu erklären. Wenn Sterne Gaskugeln sind, die während ihres gesamten Daseins sphärisch symmetrisch bleiben – wie können sie solch komplizierte Muster bilden wie Ameisen, Seesterne oder Katzenaugen?

Krampfartige Zuckungen

Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurde den Astronomen klar, dass sich sterbende Sterne in zwei verschiedene Klassen unterteilen lassen. Die Elite der massereichen Sterne – diejenigen mit mehr als dem Achtfachen der Sonnenmasse – explodiert unvermittelt in einer Supernova. Eher durchschnittliche Sterne wie unsere Sonne siechen langsam dahin. In ihren letzten Jahren verbrennen sie den zur Neige gehenden Brennstoff in krampfartigen Zuckungen, ähnlich wie ein Automotor, dem das Benzin ausgeht.

Über Jahrmilliarden hinweg haben Kernreaktionen im Zentralbereich eines sonnenähnlichen Sterns die Energieerzeugung aufrechterhalten. Ist der Wasserstoff in seinem Zentrum verbraucht, wandert die Zone, in der Kernreaktionen stattfinden, schalenförmig nach außen, wo noch frisches Gas vorhanden ist. Dabei bläht sich der Stern zu einem so genannten Roten Riesen auf. Schließlich beginnt der Stern, auch Helium zu verbrennen. Wandert diese Heliumbrennzone nach außen, wird er instabil. Heftige Zuckungen, ausgelöst durch das Wechselspiel zwischen Strahlungsdruck und Gravitation, treiben die aufgeblähten und nur noch lose gebundenen Oberflächenschichten nach außen ins Weltall und erzeugen so einen planetarischen Nebel.

Seit dem 18. Jahrhundert haben die Astronomen etwa 1500 planetarische Nebel katalogisiert. Weitere 10000 könnten noch hinter den dichten Staubwolken unserer Galaxie ihrer Entdeckung harren. Während im Mittel nur alle paar Jahrhunderte eine spektakuläre Supernova im Milchstraßensystem aufleuchtet, bildet sich jedes Jahr ein neuer planetarischer Nebel.



NASA / ESA UND J. HESTER, ARIZONA STATE UNIVERSITY; NASA UND HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI / AURA)

▲ **Der Ringnebel (M57) im Sternbild Leier ist bereits mit Amateurfernrohren zu sehen. Doch seine ganze Pracht enthüllt erst das Hubble-Weltraumteleskop, das von außerhalb der störenden Erdatmosphäre beobachtet.**

IN KÜRZE

▶ **Planetarische Nebel** sind leuchtende Überreste normalgroßer Sterne. In Großteleskopen erscheinen sie wie Juwelen am Himmel.

▶ Die Nebel entstehen, wenn Sterne mit weniger als der achtfachen Masse unserer Sonne gegen Ende ihres Daseins ihre äußere Hülle abstoßen. Dieser **Sternwind** weht mit bis zu 1000 Kilometer pro Sekunde ins All. Der Reststern, der nunmehr seine inneren heißen Schichten freilegt, ionisiert mit seiner ultravioletten Strahlung den Wind und regt ihn zum Leuchten an.

▶ Die erstaunlich komplexen Strukturen, die manche planetarischen Nebel zeigen, sind noch nicht in allen Einzelheiten verstanden. **Magnetfelder** oder **nahe Begleitsterne** könnten die Ursache für so genannte bipolare Nebel sein.

Diese Objekte sind keineswegs so luftig und ruhig, wie sie auf den Bildern erscheinen. Ganz im Gegenteil: Jeder planetarische Nebel hat ungefähr ein Drittel der Masse unserer Sonne und enthält nahezu das gesamte unverbrauchte Brennmaterial des Sterns, aus dem er entstand.

Anfangs strömen die losen äußeren Schichten mit zehn bis zwanzig Kilometer pro Sekunde vom Stern weg. Dieser vergleichsweise langsame Wind bildet die Hauptmasse des Nebels. Doch in dem Maße, in dem der Stern nach und nach seine äußeren Schichten abbläst und den immer noch heißen Kern freilegt, wechselt dessen Farbe von orange über gelb bis hin zu weiß und schließlich blau – sichtbares Zeichen dafür, dass seine Oberflächentemperatur auf über 25000 Kelvin ansteigt. Der heiße Stern überflutet nun das Gas in seiner Umgebung mit energiereichem ultraviolettem Licht. Dieses bricht die Moleküle des Gases in ihre Bestandteile auf und schlägt Elektronen aus den Atomschalen heraus.

Mit der Zeit trägt der Sternwind immer weniger Masse mit immer höherer Geschwindigkeit vom Stern weg. Nach einhunderttausend bis einer Million Jahren – je nach Anfangsmasse des Sterns – flaut der Wind komplett ab, und der Reststern setzt sich gewissermaßen als extrem dichter und heißer Weißer Zwerg zur Ruhe. Übrig bleibt Sternenasche, die von ihrer Schwerkraft in eine nahezu kristalline Kugel von der Größe der Erde zusammengequetscht ist.

Blasen und Schmetterlinge im All

Bis in die 1980er Jahre hielten Astronomen planetarische Nebel für sich ausdehnende kugelförmige Blasen. Denn die Kräfte, die das Material vom Stern wegtreiben, sollten sphärisch symmetrisch sein. Doch seit jener Zeit ist das Bild immer komplizierter und wesentlich interessanter geworden.

Den ersten Hinweis darauf, dass planetarische Nebel mehr sind als nur ein vorübergehender stellarer Schluckauf, fand man 1978. Beobachtungen im ultravioletten Licht zeigten, dass sterbende Sterne noch lange, nachdem sie ihre äußere Gashülle abgestoßen haben, Winde aussenden. Auch wenn diese nur eine geringe Dichte haben, so erreichen sie doch Geschwindigkeiten von 1000 Kilometern pro Sekunde, sind also zehnmal schneller als ihre dichteren Vorläufer.

Um die Folgen dieses Phänomens abzuschätzen, nutzten Wissenschaftler dreier kanadischer Forschungseinrichtungen – Sun Kwok von der Universität Calgary, Christopher R. Purton vom Dominion Radio Astrophysical Observatory und M. Pim FitzGerald von der Universität Waterloo – ein Sternwindmodell, das zur Erklärung anderer astrophysikalischer Phänomene entwickelt worden war. Wenn der schnelle Wind den langsamen eingeholt hat, so die Idee, sollte sich die Materie aufstauen und eine Schicht aus komprimiertem Gas bilden. Diese verdichtete Gasfront umgrenzt eine Höhlung, die nur wenig Gas enthält (das aber sehr heiß ist) und sich mit dem Fortschreiten der Front im Laufe der Zeit vergrößert.

Die Vorstellung zweier interagierender Sternwinde ist inzwischen als das Zwei-Wind-Modell bekannt und beschreibt alle sphärischen oder fast sphärischen planetarischen Nebel recht gut. In den 1980er Jahren aber erkannten die Forscher, dass kugelförmige Vertreter dieses Nebeltyps eher die Ausnahme sind. Nur etwa ein Zehntel aller planetarischen Nebel ist nahezu sphärisch geformt. Viele andere sind deutlich eiförmig. Die schönsten – allerdings recht seltenen – Exemplare weisen zwei Blasen auf entgegengesetzten Seiten des verursachenden Sterns auf. Diese »bipolaren« Nebel gleichen einem Schmetterling oder einer Sanduhr.

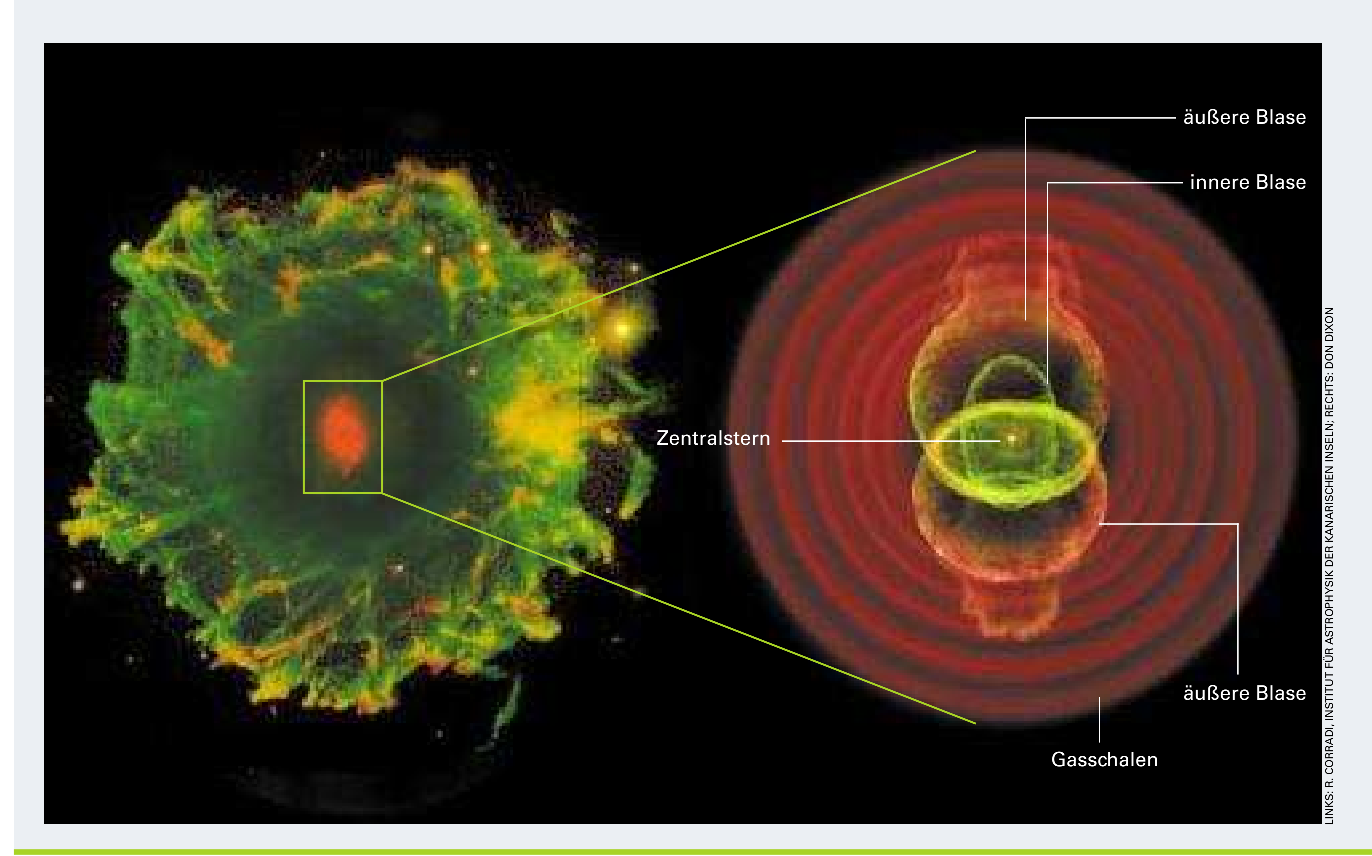
Lautloses Pfeifen im Dunkeln

Um diese Formen zu erklären, haben wir beide gemeinsam mit Vincent Icke und Garrelt Mellema von der Universität Leiden in den Niederlanden das Zwei-Wind-Modell erweitert. Angenommen, der langsame Wind formt einen dichten Ring, der den Stern äquatorial umkreist. Das nachfolgende Gas des Sternwinds sollte dann von dem Torus in Richtung der Pole umgelenkt werden, sodass ein elliptischer Nebel entsteht. Für sanduhrförmige Nebel müsste der Torus sehr eng und dicht sein und als Düse wirken. So wie beim Pfeifen die Lippen die ausgeatmete Luft in einen dünnen Strom bündeln, lenkt der Torus dann die starken Winde ab. Dadurch entsteht ein Paar von entgegengesetzten Gasströmen, welche die Form einer Sanduhr annehmen können.

Das Modell war einfach und vermochte bis 1993 alle vorhandenen Aufnahmen von planetarischen Nebeln zu erklären. Simulationen mit Supercomputern bestätigten die Grundidee, und Beobachtungen zeigten, dass der langsame Wind am Äquator tatsächlich dichter ist. Wir versuchten erst gar nicht zu be- ▷

Anatomie des Katzenauges

Das Bild auf S. 26/27 zeigt nur den innersten Teil eines viel ausgedehnteren Himmelsobjekts. In Wahrheit ist das Katzenauge noch von riesigen »Augenwimpern« umgeben – einer rundlichen Hülle dünner Gasfetzen (Foto links). Eine künstlerische Darstellung der »Pupille« zeigt die Komponenten des inneren Nebelteils (rechts): Der Zentralstern ist in eine eiförmige Gashülle eingebettet, die von zwei nach oben und unten versetzten Gasblasen umgeben ist. Diese wiederum sind von einer Reihe konzentrischer Gasschalen eingehüllt. Offenbar hat der Stern im Laufe der Jahrtausende in verschiedenen Etappen Materie abgestoßen. Die obere äußere Blase des Nebels ist dem Betrachter zugewandt.



LINKS: R. CORRADI, INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK DER KANARISCHEN INSELN; RECHTS: DON DIXON

Kunstwerke am Himmel

Die Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops enthüllen eine verblüffende Vielfalt an Formen von planetarischen Nebeln.



Der Stechrochen-Nebel (Hen 3-1357) ist der jüngste aller bekannten planetarischen Nebel. Er begann vor 20 Jahren zu leuchten. Womöglich verursachen ein Begleitstern und ein Gasring seine Form.



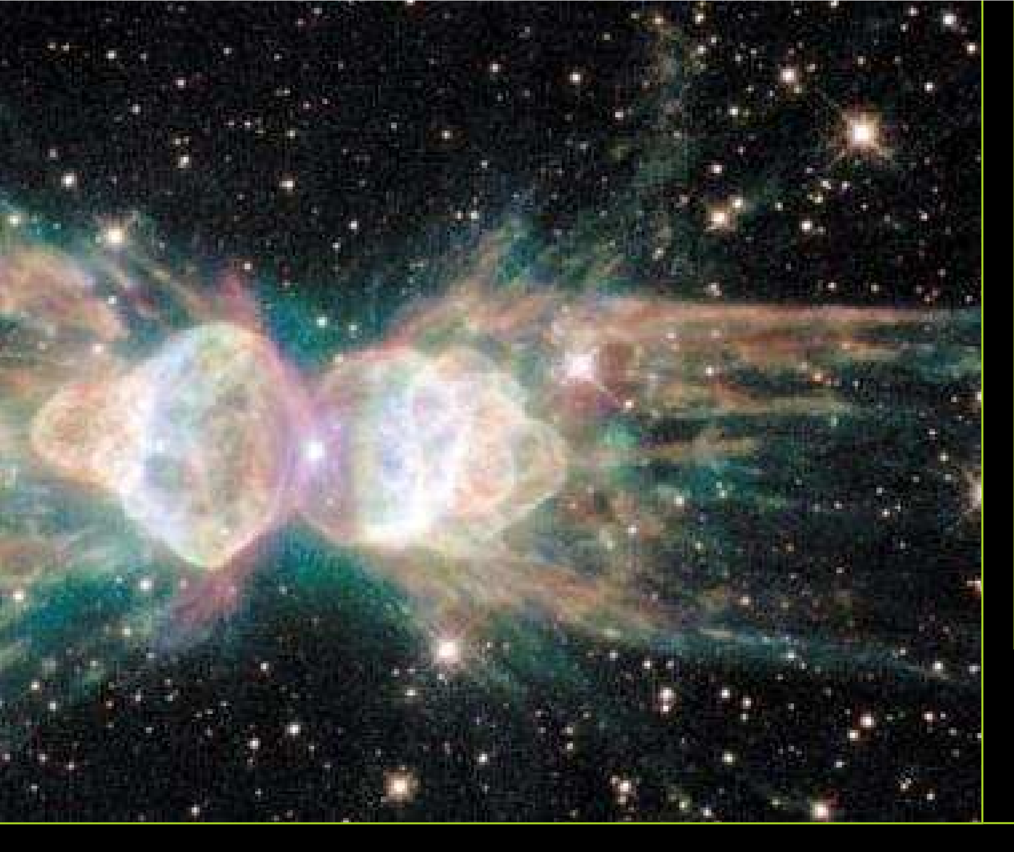
Eingehüllt in einen dichten, kohlenstoffreichen Staubring ist der Zentralstern des Schmetterling-Nebels (NGC 6302), einer der heißesten, die bisher entdeckt wurden.

Der Blaue Schneeball (NGC 7662) enthält Knoten aus Gas, die sich mit hoher Geschwindigkeit bewegen (rote Flecken).



Der Nebel NGC 6751 ist ein Beispiel für einen elliptischen planetarischen Nebel. Die Farben Rot, Grün und Blau repräsentieren schwach, mittel beziehungsweise stark ionisiertes Gas.







Das Rote Rechteck (HD 44179) erscheint kastenförmig, weil wir ineinander geschachtelte Gaskegel von der Seite aus sehen.

Der Zentralstern des Ameisennebels (Menzel 3) stößt Gas mit Geschwindigkeiten von 1000 Kilometer pro Sekunde aus.



Der Südliche Krebsnebel (He2-104) leuchtet im Licht des Wasserstoffs. Ein kleiner, heller Nebel scheint in einem größeren eingebettet zu sein. Der Rote Riese, der den Nebel erzeugt hat, wird von einem Weißen Zwergstern umkreist.



Im Zentrum des Nebels M 2-9 (Minkowskis Schmetterling) befinden sich ein Doppelsternsystem und eine Gasscheibe mit dem zehnfachen Durchmesser der Plutobahn.

Wie der Strahl einer Taschenlampe scheint der Zentralstern des Egg-Nebels (CRL 2688) konzentrische Gashüllen zu beleuchten. Die Farben werden durch unterschiedlich polarisiertes Licht verursacht.



▷ gründen, warum der langsame Wind als Torus abgestrahlt wird, weil wir hofften, eine Erklärung würde sich später finden lassen.

Doch 1994 wurde unsere Zuversicht schnell zerstört. Das Hubble-Teleskop nahm sein erstes klares Bild des von Herschel entdeckten Nebels NGC 6543 im Sternbild Drache auf (siehe Bild auf S. 26/27). Dieses schicksalsträchtige Foto des »Katzenauges« traf uns wie ein Schlag. Eine der beiden sich überschneidenden Ellipsen, ein dünner Saum um einen elliptischen Hohlraum, konnte mit dem Modell erklärt werden. Aber die anderen Strukturen? Niemand hatte solch klumpige Regionen erwartet, die rot leuchtend den Nebel durchziehen. Die beiden strahlähnlichen Auswüchse am Rand muteten noch seltsamer an. Wenn überhaupt, konnte das Zwei-Wind-Modell nur teilweise zutreffen.

Eine gängige wissenschaftliche Idee legt man nicht so einfach ad acta – selbst wenn sie solche Bilder wie die vom Hubble-Weltraumteleskop nicht erklären kann. Wir hofften also, das Katzenauge sei eine Ausnahme. Aber es war keine. Andere Hubble-Aufnahmen offenbarten zweifelsfrei, dass unsere Vorstellung vom Sterntod noch nicht vollständig war. Das fordert einen Wissenschaftler natürlich heraus. Was hatten wir übersehen? Woran hatten wir vorher nicht gedacht?

Die Theoretiker kommen ins Schwitzen

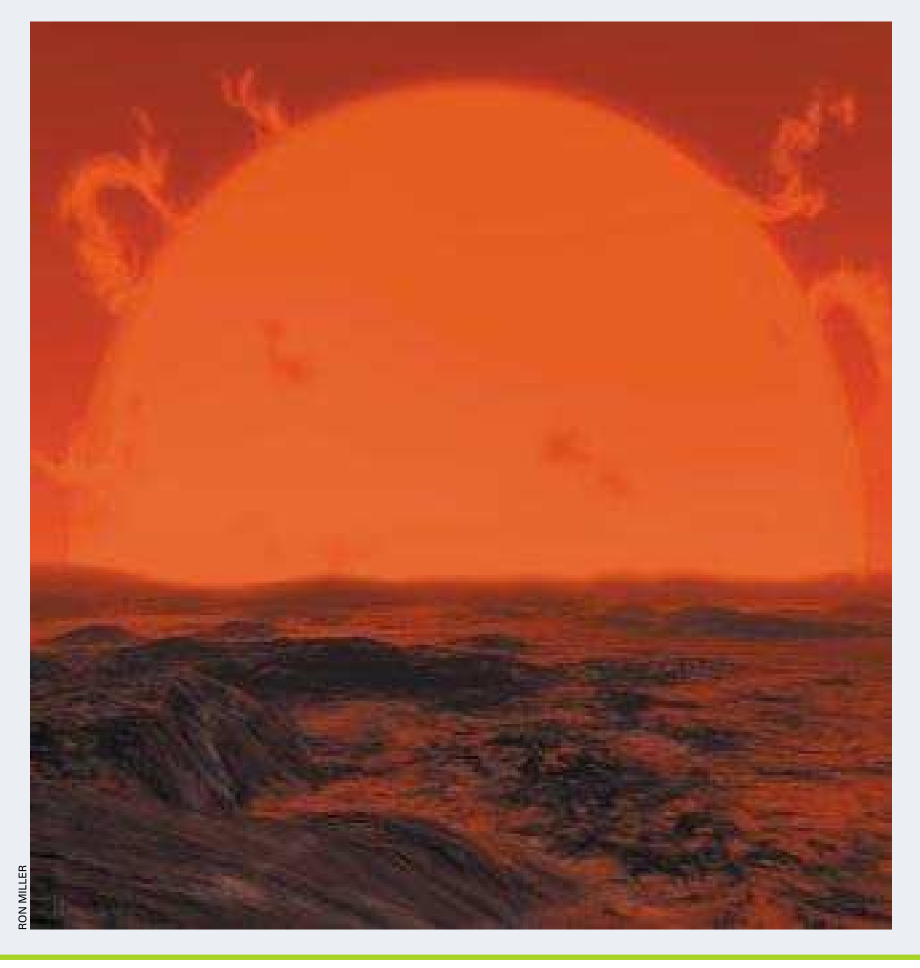
In solchen Situationen hilft es oft, die Extremfälle zu betrachten, denn dann wirken die unbekannten Kräfte vermutlich am stärksten. Im Falle der planetarischen Nebel sind es die bipolaren Objekte. Feine Strukturen, die solche Nebel durchziehen, treten paarweise auf, jeweils eine auf jeder Seite des Nebels. Diese Spiegelsymmetrie legt den Schluss nahe, dass ihre Entstehungsursachen auf irgendeine Weise miteinander verknüpft sind – so wie es bei der symmetrischen Erscheinung einer Schneeflocke oder einer Sonnenblume der Fall ist.

Das Zwei-Wind-Modell liefert für diese Objekte eine überprüfbare Voraussage: Hat das Gas einmal den Torus verlassen, so sollte es mit konstanter Geschwindigkeit weiterströmen. Das müsste an der Dopplerverschiebung des vom Gas ausgestrahlten Lichts abzulesen sein.

Leider versagt das Modell bei diesem Test. Im Jahre 1999 untersuchte einer von uns (Balick) gemeinsam mit einem Team um Romano Corradi den Südlichen Krebsnebel (He 2-104) mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Wir fanden heraus, dass seine Expansionsgeschwindigkeit proportional mit der Entfernung vom Stern wächst. Das am weitesten entfernte Gas ist also nur deshalb so weit außen, weil es am schnellsten ist.

Extrapoliert man in der Zeit zurück, so scheint sich dieser sanduhrähnliche Nebel in einer einzigen Eruption des

Gebrannte Erde



RON MILLER

Auch unsere Sonne wird am Ende ihres Daseins einen planetarischen Nebel bilden – allerdings ist dann auf der Erde niemand mehr da, der dies beobachten könnte.

In rund fünf Milliarden Jahren wird sich die Sonne zu einem Roten Riesen aufblähen, die Planeten Merkur und Venus verschlingen und auf die Größe der jetzigen Erdumlaufbahn anschwellen. Die Erde selbst wird dem Schicksal der inneren Nachbarplaneten gerade noch entgehen. Denn da die Sonne in diesem Entwicklungsstadium bereits einiges an Masse ausgeworfen haben wird, was ihre Schwerkraft reduziert, hat sich die Umlaufbahn der Erde vergrößert.

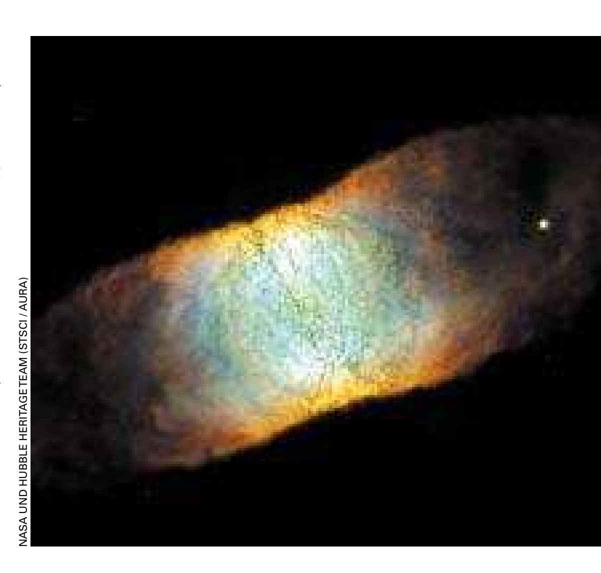
Dunkelrot glühend wird die Sonne dann den gesamten Taghimmel ausfüllen. Während ihr westlicher Rand gerade untergeht, ist der östliche noch gar nicht über den Horizont gestiegen. Obwohl ihre Oberflächentemperatur nur noch 2000 Kelvin beträgt (statt der heutigen 5600), wird sie wie ein gigantischer Backofen die

◀ **In ferner Zukunft: Bevor die Sonne in Todeszuckungen einen planetarischen Nebel erzeugt, wird sie als Roter Riese die Erdoberfläche geröstet haben.**

Sterns vor 5700 Jahren gebildet zu haben. Dieser Befund widerlegt das Zwei-Wind-Modell, dem zufolge ein kontinuierlich wehender Sternwind den Nebel bilden sollte.

Aber unser Team fand noch etwas Seltsameres: Der Südliche Krebsnebel besteht eigentlich aus zwei Nebeln. Einer befindet sich im Innern des anderen, wie bei einer russischen Matrjoschka-Puppe. Wir nahmen zunächst an, der innere Nebel sei einfach später entstanden als der äußere. Doch Beobachtungen zeigten in beiden Nebeln exakt die gleiche Geschwindigkeitsverteilung: Je weiter weg das Gas vom Stern ist, desto schneller strömt es. Darum muss sich die gesamte komplexe Struktur in einem einzigen Ereignis vor knapp sechstausend Jahren gebildet haben. Bis heute geben uns diese Beobachtungen Rätsel auf.

Den endgültigen Todesstoß erhielt das Zwei-Wind-Modell Ende der 1990er Jahre, als eine weitere Aufnahmeserie vom Hubble-Weltraumteleskop vorgelegt wurde. Eine Gruppe um Sun Kwok sowie Raghvendra Sahai und John Trauger vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) und Margaret Meixner von der Universität von Illinois hatten sehr junge planetarische Nebel beobachtet, deren Zentralsterne gerade erst dabei sind, das Gas zu ionisieren und aufzuheizen. Im Vorfeld hatten die Astronomen angenommen, solche Objekte seien einfach kleinere Versionen der älteren und größeren Nebel. Doch auch diese Vorstellung erwies sich als falsch: Gerade entstehende und junge planetarische Nebel weisen eine Vielfalt spielerischer Formen auf. Sie haben mehrere Symmetrieachsen, die sich nicht einfach mit dem von uns vermuteten Düseneffekt erklären lassen. Wie Sahai und Trauger 1998 in ihrer Veröffentlichung nahe legten, war es an der Zeit, ein neues Modell zu entwickeln.



NASA UND HUBBLE HERITAGETEAM (STSCI / AURA)

Der Retina-Nebel (IC 4406) im südlichen Sternbild Wolf schillert in prächtigen Farben. Das vom sterbenden Stern ausgeworfene Gas bildet einen Ring, den wir von der Seite sehen.

Nach und nach zeichneten sich die Konturen einer brauchbaren Theorie ab, die tatsächlich die Entstehung planetarischer Nebel in all ihrem Formenreichtum zu erklären vermag. Inzwischen sind sich die Wissenschaftler einig, dass ein wesentlicher Faktor der Schwerkrafteinfluss von Begleitsternen ist. Mindestens die Hälfte aller Sternpunkte, die man am Nachthimmel sieht, sind in Wirklichkeit Doppelsterne, die einander umkreisen. In den meisten dieser Doppelsysteme sind die Komponenten so weit auseinander, dass sie sich unabhängig voneinander entwickeln. Nur bei wenigen Systemen kann die Schwerkraft des einen Partners den Materialfluss vom anderen ablenken oder sogar steuern. Ihr Anteil an allen Doppelsternsystemen ist genauso groß wie der Anteil der bipolaren Objekte an den planetarischen Nebeln.

Stellarer Kannibalismus

Mario Livio vom Space Telescope Science Institute in Baltimore und sein ehemaliger Doktorand Noam Soker, der nun am Technion-Israel Institute of Technology forscht, vertraten die Doppelsternidee, lange bevor sie allgemein anerkannt wurde (siehe »Planetarische Nebel« von Noam Soker, Spektrum der Wissenschaft 7/1992, S. 60). In ihrem Szenario fängt der Begleiter Material ein, das von dem sterbenden Stern wegströmt. In einem engen Doppelsystem, in dem die Umlaufbahn kleiner ist als die Bahn des Merkurs um die Sonne und eine Umkreisung nur Tage dauert, erfolgt dieser Transfer allerdings nicht geradlinig. Bis das Auswurfmaterial beim Begleiter ankommt, ist dieser auf seiner Bahn bereits weitergezogen. Das durch Gezeitenkräfte entrissene Gas folgt dem dichteren Begleitstern also wie ein langer, gebogener Schwanz. Diese Nachhut entwickelt sich schließlich zu einer dichten, dicken Scheibe, die den Begleiter umwirbelt. Simulationen zeigen inzwischen, dass sogar ein Begleitstern, der so weit entfernt ist wie Neptun von der Sonne, eine derartige Akkretionsscheibe aufbauen könnte.

Nun kann die Geschichte eine interessante Wendung nehmen: Bläht sich der sterbende Stern zum Roten Riesen auf, so verschluckt er gleichsam seinen Begleiter mitsamt Scheibe.

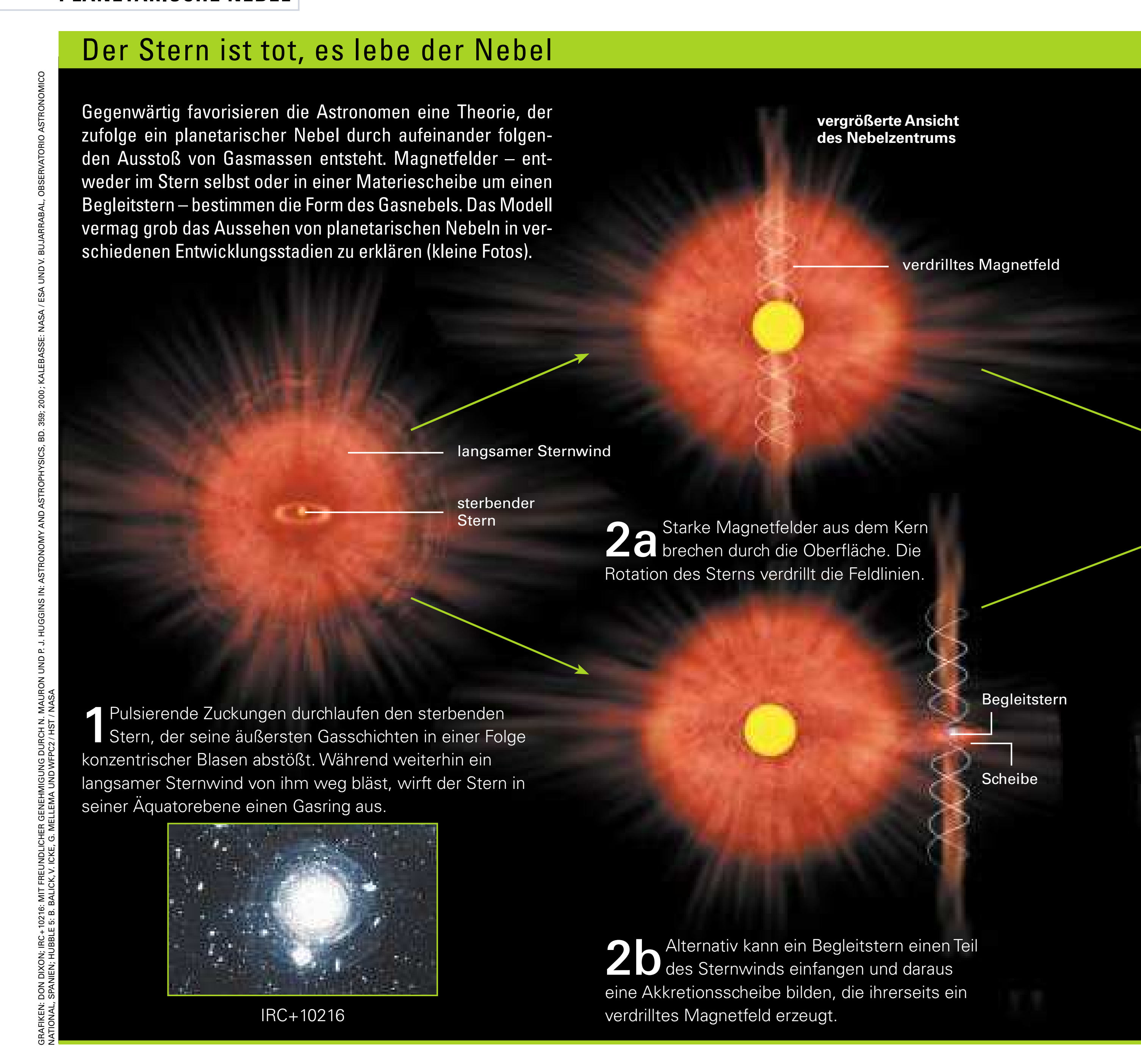
Dieser stellare Kannibalismus bleibt indes nicht ohne Folgen. Zunächst pflügen Begleitstern und Scheibe durch die äußeren, relativ dünnen Schichten des aufgedunsenen Riesen und dringen immer tiefer ein. Dabei verformt sich der größere Stern; seine Materieausstöße werden immer chaotischer, und es bilden sich gekrümmte Gasfontänen. Nach und nach sinkt der Begleiter immer tiefer in den Riesenstern hinein, bis er mit dessen Kern verschmilzt. In diesem Moment hören die Materieauswürfe auf. Der skizzierte Mechanismus könnte erklären, ▷

Erde ausdörren und zu einer riesigen Terrakotta-Kugel verbacken.

Die Erschaffung eines planetarischen Nebels erlebt die Erde dann quasi von innen mit. Der Sonnenwind wird sich zu einem wahren Orkan gesteigert haben, der die äußere Hülle der Sonne davonträgt. Mit der Zeit wird der rote Gasball nur noch seinen heißen Kern übrig behalten, der als Weißer Zwerg von der Größe der Erde endet. Durch diese himmelblaue Punktquelle beleuchtet, werden Berge und Hügel auf unserem ehemaligen Heimatplaneten sehr scharfe und tiefdunkle Schatten werfen. Sonnenauf- und -untergänge werden nur wenige Sekunden dauern. Ungeschützter Fels wird von der alle Molekülbindungen zerstörenden UV-Strahlung zu Plasma verdampft. Ein unheimlicher, schillernder, wabernder Nebel wird die Erdoberfläche bedecken.

Im Laufe der Äonen wird der gleißende Zwergstern am Himmel seine Restenergie verschleudert haben und zu kalter dunkler Asche verblassen. Mit ihm zusammen kühlt auch der Planet aus, der einmal Leben beherbergt hat – untergegangen im Feuer, wird er zu einem eisigen Himmelskörper erstarren.

Der Stern ist tot, es lebe der Nebel



Gegenwärtig favorisieren die Astronomen eine Theorie, der zufolge ein planetarischer Nebel durch aufeinander folgenden Ausstoß von Gasmassen entsteht. Magnetfelder – entweder im Stern selbst oder in einer Materiescheibe um einen Begleitstern – bestimmen die Form des Gasnebels. Das Modell vermag grob das Aussehen von planetarischen Nebeln in verschiedenen Entwicklungsstadien zu erklären (kleine Fotos).

1 Pulsierende Zuckungen durchlaufen den sterbenden Stern, der seine äußersten Gasschichten in einer Folge konzentrischer Blasen abstößt. Während weiterhin ein langsamer Sternwind von ihm weg bläst, wirft der Stern in seiner Äquatorebene einen Gasring aus.

IRC+10216

2a Starke Magnetfelder aus dem Kern brechen durch die Oberfläche. Die Rotation des Sterns verdrillt die Feldlinien.

2b Alternativ kann ein Begleitstern einen Teil des Sternwinds einfangen und daraus eine Akkretionsscheibe bilden, die ihrerseits ein verdrilltes Magnetfeld erzeugt.

GRAFIKEN: DON DIXON; IRC+10216: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DURCH N. MAURON UND P. J. HUGGINS IN: ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, BD. 359; 2000; KALEBASSE: NASA / ESA UND V. BUJARRABAL, OBSERVATORIO ASTRONOMICO NATIONAL, SPANIEN; HUBBLE 5: B. BALICK, V. ICKE, G. MELLEMA UND WFPC2 / HST / NASA

▷ warum manche Nebel so aussehen, als sei der Ausstrom von Materie unvermittelt abgebrochen.

Auch starke Magnetfelder im Stern oder in der Scheibe eines eventuellen Begleiters könnten die Form eines planetarischen Nebels bestimmen. Da das meiste Gas im Weltall ionisiert, also elektrisch geladen ist, wird seine Bewegung von Magnetfeldern beeinflusst. So, wie das Erdmagnetfeld Teilchen des Sonnenwinds einfängt und entlang seiner Feldlinien in die Polarregionen lenkt, wirken starke Magnetfelder in Sternen wie Bahnen, entlang derer das ionisierte Gas strömt. Umgekehrt können intensive Sternwinde auch die Magnetfelder verformen, dehnen oder verwirbeln.

Magnetfeld als Windursache

Mitte der 1990er Jahre schlugen Roger A. Chevalier und Ding Luo von der Universität von Virginia vor, dass die ausströmenden Sternwinde losgelöste Magnetfeldschlaufen mit sich tragen. Das Kräftemessen zwischen Gas und Magnetfeld kann dem Sternwind die exotischsten Formen verleihen. Gegen das Modell spricht, dass ihm zufolge das Feld zu Beginn nur schwach sein und mit der Erzeugung des Winds nichts zu tun haben darf. Das ist ein Problem, denn offenbar sind Magnetfelder an der Oberfläche eines Sterns für die Winderzeugung unentbehrlich.

Wie können starke Magnetfelder überhaupt Materie in den Raum schleudern? Solange die Energie im Innern eines sterbenden Sterns noch durch Konvektion nach außen transportiert wird, steigen die im Kern verankerten Felder mit dem Gas auf und werden, falls der Kern schnell rotiert, wie eine Feder aufgewickelt. Durchstoßen sie die Oberfläche, so wird ihre Spannung frei, und sie

Saum

schneller Wind

Jet

3 Unabhängig von der Art seiner Erzeugung kann das Magnetfeld für eine gewisse Zeit Gas in einen Materiestrahl zwängen, der in die Blase aus langsamem Sternwind eindringt. Die Blase selbst nimmt wegen des äquatorialen Rings die Form einer Sanduhr an.

Kalebasse (OH 231.8 + 4.2)

4 Der Stern sendet nun einen schnellen Sternwind aus, der auf den langsamen aufläuft und diesen zu einer dünnen Schicht aufstaut.

Hubble 5

schleudern Material nach außen. Ein ähnlicher Prozess kann in einer Akkretionsscheibe mit Magnetfeld stattfinden.

Tatsächlich können sowohl Stern als auch Akkretionsscheibe jeweils eigene Winde abstrahlen. Einige der seltsamen multipolaren Formen von jungen planetarischen Nebeln rühren wohl daher, dass die Symmetrieachsen dieser Winde gegeneinander geneigt sind. Zusammen mit Eric G. Blackman von der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York), Sean Matt von der McMaster-Universität in Hamilton (Kanada) und ihren Kollegen erforscht einer von uns (Frank) diese Phänomene. Der springende Punkt dabei ist, dass Magnetfelder, ebenso wie Doppelsterne, zusätzliche Kräfte ins Spiel bringen, die eine wesentlich breitere Formenvielfalt erzeugen können als das Zwei-Wind-Modell.

Doch trotz aller Fortschritte steckt unser Wissen über die Entstehung von planetarischen Nebeln noch immer in den Kinderschuhen. An der grundlegenden Beschreibung eines Sternentods gibt es wohl nichts zu rütteln. Am Ende ihrer Entwicklung fängt die Energieerzeugung in Sternen an zu stottern, und sie stoßen ihre äußere Hülle ins Weltall ab. Die Theorien über Sternaufbau und Sternentwicklung gehören zu den erfolgreichsten wissenschaftlichen Theorien des 20. Jahrhunderts. Sie erklären die beobachteten Eigenschaften der meisten Sterne sehr gut – ihre Energieabstrahlung, ihre Temperatur und selbst die meisten ihrer Eigentümlichkeiten. Dennoch gibt es noch viel Erklärungsbedarf – besonders über die Anfangs- und Endphasen eines Sterns.

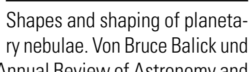
Als Astrophysiker glauben wir, die Mechanismen gefunden zu haben, auf denen die Gasausstöße von sterbenden Sternen beruhen. Was wir aber noch nicht verstehen ist, wie diese Regeln zusammenspielen, damit etwas so harmonisch Strukturiertes wie ein planetarischer Nebel entstehen kann. Was treibt den Sternwind an? Wann sind Begleitsterne wichtig? Welche Rolle spielen Magnetfelder? Wodurch bilden sich mehrfach verschachtelte Nebel?

Die ästhetischen Aufnahmen des Hubble-Teleskops und anderer Observatorien, die im letzten Jahrzehnt für so viel Erstaunen und Entzücken sorgten, haben fast jeden Zweig der astronomischen Forschung befruchtet. Scheinbar etablierte Theorien mussten überdacht, teilweise verworfen werden. Das ist der Weg des Fortschritts. So unbequem manche Entdeckungen manchmal sein mögen: Sie trennen die Spreu vom Weizen, indem sie mit Vorurteilen aufräumen und den Weg für großartige Schritte nach vorn bereiten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Bruce Balick (oben) ist Dekan der astronomischen Fakultät der Universität von Washington in Seattle, **Adam Frank** Professor an der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York). Über planetarische Nebel und deren Vorgängersterne haben die beiden Astronomen ausgiebig geforscht.



Shapes and shaping of planetary nebulae. Von Bruce Balick und Adam Frank, in: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 40, S. 439, 2002

Cosmic butterflies: the colorful mysteries of planetary nebulae. Von Sun Kwok. Cambridge University Press, 2001

The shapes of planetary nebulae. Von Bruce Balick, in: American Scientist, Bd. 84, Heft 4, S. 342, Juli 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



JACK UNRUH



Çatal Hüyük – Stadt der Frauen?

Steinzeitliche Bauern lebten in einer matriarchalischen Gesellschaft. Neue Grabungen in der größten Stadt der Zeit vor 9000 Jahren stellen diese gängige Anschauung in Frage.

▲ In der 9000 Jahre alten Siedlung Çatal Hüyük pulsierte das Leben – Brote wurden gebacken, Tiere verarbeitet, Stoffe gewebt sowie Werkzeuge aus Obsidian geschlagen. Viele dieser Arbeiten fanden auf den Dächern statt. Die bildeten auch die Verkehrswege, denn die Stadt hatte keine Straßen, Häuser wurden durch Einstiegsöffnungen betreten.

Von Ian Hodder

Eine Stadt ohne Straßen? Das wäre heute undenkbar. Doch die Siedlung, die Menschen vor 9000 Jahren am Ufer eines Flusses gründeten, wuchs im Laufe der Zeit auf etwa 2000 Häuser an. Dicht gedrängt lebten dort in Çatal Hüyük bis zu 8000 Menschen, eine für die damalige Zeit unglaubliche Zahl. Wie also sollte man diesen Ort im anatolischen Hochland anders bezeichnen denn als Stadt? Gerade mal 100 000 Quadratmeter groß – das entspricht in etwa 14 Fußballfeldern – blieb darin aber kein Platz für Wege; man gelangte in die Häuser über die Dächer (siehe Bild). Was Ausgräber dort fanden, war sehr beeindruckend: Die Bewohner Çatal Hüyüks lebten mitten in Darstellungen von Stieren, Hirschen, Leoparden, Geiern und menschlichen Figuren.

Wer auf dem 15 Meter hohen Siedlungshügel arbeitet oder sich mit den jahrtausendealten Werkzeugen, Skelettresten und anderem beschäftigt, taucht tief in die Welt der Jungsteinzeit ein. Nahrungsreste verraten, dass seine Bewohner schon in den Anfängen der Stadt Getreide und Hausschafe verzehrten. Zusätzlich jagten sie wilde Rinder, Schweine und Pferde und ergänzten ihre Nahrung mit Wildpflanzen. Die Stätte ist zwar nicht die älteste agrarwirtschaftliche Siedlung, die wir Archäologen kennen, doch ihre Größe und die hoch stehende Kultur machen sie zu einem wich- ▷



Schon bei den ersten Ausgrabungen in den 1960er Jahren kam in einem Getreidebehälter diese 16,5 Zentimeter große Tonstatuette einer weiblichen Figur zum Vorschein. Ihre Gestalt und die sie stützenden Leoparden legten eine Deutung als Muttergottheit nahe. Vermutlich symbolisierte sie aber die Rolle der Frau in der damals noch jungen Kunst des Ackerbaus.

MEHMET GÜLBIZ

tigen Fixpunkt in der Diskussion um die frühe Landwirtschaft und damit verbundene Lebensweisen. Zum Beispiel galt Çatal Hüyük lange als Beleg einer matriarchalisch geprägten Gesellschaft mit ihren typischen Elementen: Frauen in den Führungspositionen, die mütterliche Linie als Träger der Ahnenreihe und dementsprechend auch eine Muttergottheit als zentrale Figur.

Am Anfang war das Matriarchat?

Diese Vorstellung ist noch recht jung. Bis zum 18. Jahrhundert glaubten die europäischen Wissenschaftler vielmehr – basierend auf Aristoteles und den Schriften der Bibel –, dass ein Patriarchat am Anfang jeder Gesellschaft stehen müsse. Dann aber wurden in Nordamerika Gemeinschaften entdeckt, die ihre Herkunft nach der Reihe der mütterlichen Ahnen bestimmten, und schließlich postulierte der Schweizer Jurist Johann Bachofen im frühen 19. Jahrhundert, dass dem Patriarchat ein Vorläufer mit matriarchalischen Strukturen vorausgehe.

Diese Ideen hatten großen Einfluss auf die Intellektuellen des späten 19. und 20. Jahrhunderts, auf die Psychoanalyse ebenso wie auf die Archäologie. In jener Geistestradition stand auch der erste Ausgräber Çatal Hüyüks, James Mellaart von der Universität London, der von 1961 bis 1965 dort arbeitete. So nimmt es nicht wunder, dass er opulente Frauenfiguren im Fundgut als Darstellungen einer Muttergottheit interpretierte. Vor allem die Skulptur einer nackten Frau auf einem Katzenthron (der vermutlich zwei Leoparden zeigen soll) schien in der Tat die Herrin der Natur wiederzugeben (siehe Bild).

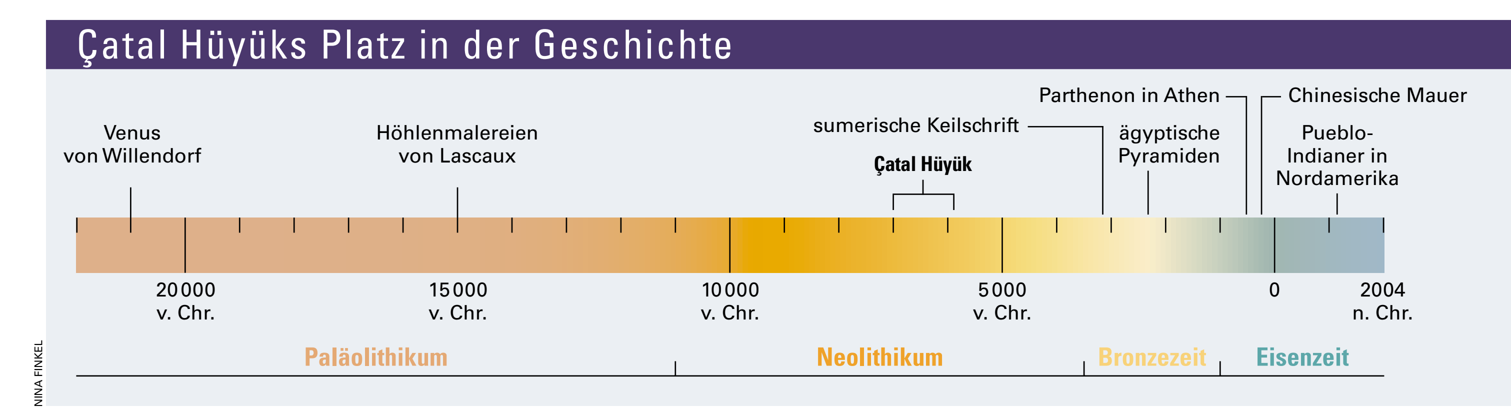
Die Archäologin Marija Gimbutas von der Universität Kalifornien in Los Angeles konstatierte dementsprechend, dass eine frühe, matriarchalisch orientierte Phase mit dem Aufkommen des Ackerbaus in Europa, besonders aber in Çatal Hüyük nachweisbar sei. Patriarchalische Gesellschaften seien ein späterer Entwicklungsschritt, der mit dem Aufkommen von Metallurgie, Pferdezucht und organisiertem Krieg einherging. Diese Idee wurde zum zentralen Grundsatz der New-Age-Bewegung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Reisebusse karrten moderne Jünger der »großen Mutter« nach Çatal Hüyük, um dort zu beten und sich der Göttin nahe zu wähnen.

Doch ohne die gut gemeinten Absichten dieser Esoteriker in Zweifel zu ziehen, stellt sich heute die Frage: War diese neolithische Siedlung wirklich eine solche Bastion der Weiblichkeit? Was hat es in Çatal Hüyük wirklich bedeutet, als Mann oder als Frau geboren zu sein? Archäologen verschiedener Hochschulen weltweit haben 1993 die Grabungen wieder aufgenommen, neue Methoden insbesondere auch der Auswertung haben unser Bild dieser Stadt verändert. Nicht weniger als 18 Bauphasen lassen sich aber bereits unterscheiden, jede auf der vorigen errichtet. Das Hauptaugenmerk lag bislang vor allem auf den mittleren und unteren Schichten, die Spät-

IN KÜRZE

- Eine 9000 Jahre alte Siedlungsstätte im türkischen Çatal Hüyük erwies sich als **Stadt ohne Straßen**, bestehend aus Tausenden dicht gedrängter Häuser.
- Die Bewohner kletterten über Treppen von den Dächern aus in ihre Wohnräume, die mit **Wandmalereien und Skulpturen** ausgeschmückt waren.
- Das Leben von Männern und Frauen scheint sich nicht sonderlich unterschieden zu haben. Das eine oder das andere Geschlecht mag zu bestimmten Zeiten der Siedlungsgeschichte in einem gewissen Bereich über mehr Macht verfügt haben – **Männer auf der Jagd, Frauen in der Pflanzenzucht** zum Beispiel –, doch beide Geschlechter hatten vermutlich Schlüsselrollen im sozialen sowie im religiösen Leben inne.

Çatal Hüyüks Platz in der Geschichte



zeit der Siedlung ist weniger gut bekannt. Mit neuen Methoden werden die Funde untersucht, so auch die Skelette aus den zahlreichen Gräbern. Die Menschen bestatteten ihre Toten unter dem Fußboden ihres Hauses, um den Vorfahren nahe zu sein. Und so bietet es sich an, die obige Frage umzuformulieren: Liefern die Skelettreste von Männern und Frauen, Knaben und Mädchen Hinweise auf unterschiedliche Lebensweisen?

Gleichberechtigung bei Tisch

Um es vorwegzunehmen, die Antwort lautet: Nein! Hätte eines der Geschlechter eine dominierende Rolle innegehabt, so wäre damit zum Beispiel eine hochwertigere Ernährung einhergegangen – etwa mehr oder besseres Fleisch. Mike Richards und Jessica Pearson von der Universität Oxford haben in Knochen eingebaute stabile Kohlenstoff- und Stickstoffisotope verglichen. Weil manche Enzyme die leichten und schweren Varianten dieser für den Aufbau von Aminosäuren wichtigen Elemente unterschiedlich behandeln, reichern sich die schweren Isotope innerhalb der Nahrungskette vom Pflanzen- zum Fleischfresser an (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 90).

Von Mineralien der Knochen gegen den Abbau geschützt, erhält sich das gerüstbildende Kollagen und bietet dem Archäologen eine ideale Quelle, um zu untersuchen, ob sich ein Lebewesen einst hauptsächlich vegetarisch oder von Fleisch ernährt hat. Insgesamt 62 in einem einzigen Haus bestattete Einwohner Çatal Hüyüks dienten den beiden Wissenschaftlern als Informationsquelle über die Frühzeit des Ortes. Das Ergebnis: Ein signifikanter Unterschied in der Ernährung lässt sich nicht nachweisen.

Das gilt auch für die Abnutzung der Zähne, wie Basak Boz, Doktorand der Universität Hacettepe in Ankara, in Zusammenarbeit mit Peter Andrews, Universität Oxford, und Theya Molleson vom Museum für Naturgeschichte in London feststellte. Die »Gebrauchsspuren« im Schmelz lassen darauf schließen, dass beide Geschlechter in gleichem Maße einen Brei aus ganzen Getreidekörnern verzehrten. Die Untersuchung der Knochen ergab zudem, dass Männer kaum größer waren. Allerdings waren Frauen offenbar dicker, was die Form der erwähnten Figurinen inspiriert haben könnte. Im Großen und Ganzen aber dürften Ernährung und Lebensstil der Geschlechter vergleichbar gewesen sein.

Molleson verglich zudem die Abnutzung der Knochen, lassen sich daraus doch oft Hinweise auf die jeweils vornehmlich ausgeübte Tätigkeit gewinnen. Wer zum Beispiel häufig kniet, etwa beim Getreidemahlen, erleidet vor allem an Hüften und Schultern Verschleiß, während das Tragen großer Gewichte eher die Wirbelsäule belastet. Doch offenbar verrichteten die Bewohner dieses Hauses sehr ähnliche Tätigkeiten. Andrews und Molleson bemerkten bei vielen Skeletten eine schwarze Ablagerung ▷

Die neolithische Stadt Çatal Hüyük lag einstmals am Ufer eines Flusses inmitten von sumpfigem Schwemmland. Der Fluss ist längst trocken gefallen. Die etwa tausend Meter über dem Meeresspiegel gelegene Ausgrabungsstätte in der anatolischen Hochebene umgeben heute fruchtbare Weizenfelder.



an der Innenseite der Rippenbögen – Ruß. Die Ursache liegt auf der Hand: Räume wurden nur über die Einstiegsluke belüftet, sodass häufig Rauch eingeatmet wurde. Vor allem im bitterkalten Winter dürften die Bewohner nur selten ihre Häuser verlassen haben, während andererseits mehr Feuer brannte. Während die Körper der Verstorbenen zerfielen, lagerte sich der Kohlenstoff an den Innenwänden der Rippenbögen ab. Ein Vergleich bestätigte: Männer und Frauen verbrachten in jener Phase Çatal Hüyüks gleichermaßen viel Zeit in den Räumen.

Eine weitere Quelle, die Machtverhältnisse zwischen den Geschlechtern zu klären, ist ein aus heutiger Sicht bizarrer Brauch: Bei manchen Bestattungen wurde das Grab etwa ein Jahr nach der Beisetzung wieder geöffnet und der Schädel mit einem Messer vom Hals getrennt, klar erkennbar durch die Schnittspuren an den verbliebenen Knochen. Diese Köpfe dienten sicher rituellen Zwecken, zum Beispiel – wie entsprechende Funde zeigen –, wenn ein Haus aufgegeben wurde. Diese Praxis war unter den frühen Ackerbaugesellschaften der Türkei und des Nahen Ostens weit verbreitet. An einigen Orten, wie etwa in Jericho, erhielten die Schädel der Verstorbenen sogar mit Gips modellierte Gesichtszüge.

Eine solche Sonderbehandlung wurde aber vermutlich nur besonders wichtigen Personen zuteil – vielleicht im Wortsinne den »Oberhäuptern« einer Familie. Und auch hier zeigt sich wieder keinerlei Hinweis für eine unterschiedliche soziale Bedeutung der Geschlechter. Auch wenn es Spekulation ist: Vermutlich wurde die Familienzugehörigkeit sowohl durch die Mutter als auch durch den Vater definiert.

Ethnografische Vergleiche

Auch die Lage von Gräbern und die Umstände der jeweiligen Bestattung verraten mitunter soziale Unterschiede in einer Gemeinschaft. Wurden Männer in einem anderen Teil des Raums begraben? Liegen sie auf ihrer linken Körperseite und Frauen auf der rechten? Hat man die Köpfe geschlechtsspezifisch in andere Richtungen gedreht? Unterscheiden sich die Beigaben? Naomi Hamilton, Postdoktorandin an der Universität Edinburgh, suchte kürzlich nach derartigen Mustern. Doch auch sie konnte keine klaren Unterschiede feststellen.

Schöner Wohnen in der Steinzeit

Im Jahre 1958 entdeckten Archäologen eine jungsteinzeitliche Siedlung unter einem Hügel, der sich aus der zentraltürkischen Ebene erhob. Zu ihrer Überraschung erwies sich der Ort, der bis 7000 v. Chr. zurückdatiert werden kann, als regelrechte Stadt. Çatal Hüyük (türkisch für »gegabelter Hügel«) hatte mehrere tausend Einwohner, die in eindrucksvoller sozialer Organisation zusammenlebten. Sie hatten eine komplexe Religion entwickelt, waren Meister im Weben, Töpfern und Fertigen von Steinwerkzeugen aus Obsidian und bewiesen erstaunliche Talente für Malerei und Skulptur.

Die Forscher unterschieden 18 übereinander liegende Siedlungsschichten auf der etwa 100 000 Quadratmeter großen Fläche. Nach wie vor sind zwar nur vier Prozent der Fläche ergraben, doch die Tendenz ist klar: Weil neue Häuser direkt auf den Fundamenten der alten gebaut wurden, zeigt der Grundriss der Stadt eine gewisse Gleichförmigkeit. Nur gelegentlich teilte man beim Neubau Flächen oder legte sie zusammen, manchmal entstanden auch Innenhöfe. Insgesamt aber dominieren Ordnung und strenge Planung: im Standardgrundriss der Häuser, in der Größe der Lehmziegel, in der Höhe der Türdurchlässe und Dachöffnungen, der Herde und Öfen, sogar in der Größe der Räume.

So variiert die Grundfläche der Häuser zwischen 11 und 48 Quadratmeter, sie ist jedoch immer rechteckig. Die Gebäude waren stets einstöckig. Das Grundgerüst bestand aus Holzbalken, die Wände waren aus in der Sonne getrockneten Lehmziegeln, Ried und Gips gefertigt. Bündel von Ried bildeten die flachen Dächer, mit einer dicken Lehmschicht gegen Wind und Wetter versiegelt; eine Strohmatte auf ihrer Unterseite sollte verhindern, dass Riedstücke in den Wohnraum fielen.

Der Zugang erfolgte über die Dächer, andere Eingänge gab es nur wenige. Eine Treppe aus Balken lief jeweils an der Südwand empor, auch heute noch als diagonaler Abdruck am Mauerwerk erkennbar. Eine andere Treppe führte dann vom Einstiegsloch hinab in den Wohnbereich. Über Leitern erfolgte der Zugang zur Stadt, bei Gefahr waren sie leicht zu entfernen.

Skulpturen und Wandbemalungen schmückten die Innenräume; es sind sogar die ältesten bekannten Malereien auf von

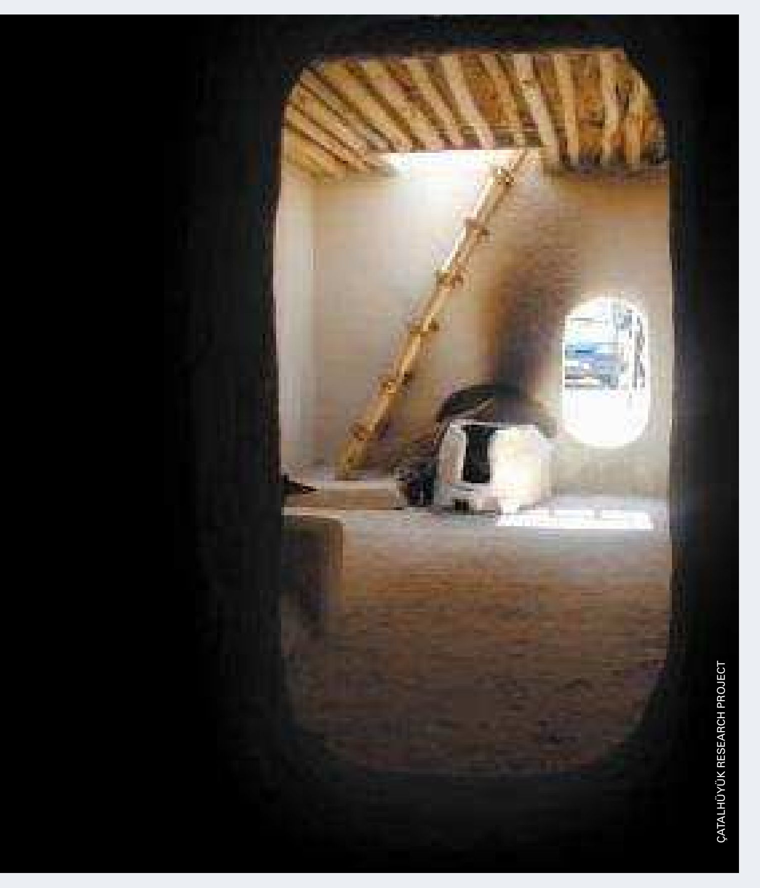


Archäologen haben ein für Çatal Hüyük typisches Haus rekonstruiert. Innenwände und eingebaute Bänke sind mit Gips verputzt und mit Steinen geglättet. Experimentell wurde die Mischung der Farbpigmente für die Wandmalereien ermittelt. Auch die Öfen (Bild rechts; unter der Leiter) waren im praktischen Einsatz: Bei einer Befeuerung mit Tierdung und Holz wurden die Rückstände gemessen und mit den archäologischen Ablagerungen verglichen.

Die Bestattungen deuten also eine Gleichstellung im Tode an, doch vielleicht gab es ja zu Lebzeiten verschiedene Raumaufteilungen? Archäologen vergleichen dazu gern ihre Befunde mit heutigen, nichteuropäischen Mikrogesellschaften, in denen die Männer Steinwerkzeuge anfertigen, die Frauen hingegen töpfern und kochen. Das Problem ist zwar, dass sich immer ethnografische Gegenbeispiele finden lassen. Aber nehmen wir für einen Moment an, dass in Çatal Hüyük tatsächlich eine solche geschlechtsspezifische Arbeitsteilung praktiziert wurde, zumindest was die Arbeiten im Haus anbelangt. Lassen sich dafür Belege finden? Die Skelette haben hier nicht weitergeholfen, doch mag es andere Spuren der Tätigkeiten geben. Jede Behausung verfügte über einen Herd oder Ofen. Darum ▷



Menschenhand geschaffenen Wänden. Der Hauptraum diente als Küche, Ess-, Wohn- und Schlafzimmer. Der Kochbereich befand sich beim Einstiegsloch, damit Rauch abziehen konnte. Nebenräume dienten als Lager, man konnte sie nur gebückt oder gar kriechend betreten.



ÇATALHÜYÜK RESEARCH PROJECT

Plattformen entlang der Wände dienten offenbar zum Sitzen, Arbeiten und Schlafen. Sie waren ebenfalls sorgfältig verputzt, Reisig oder Stroh boten eine Unterlage für Kissen oder Decken. Niemals schliefen mehr als acht Personen in einem Raum, die meisten Familien waren wahrscheinlich kleiner. Die Plattformen hatten aber noch eine andere wichtige Funktion: Darunter begrub man die Toten, in Hockerstellung fest in Stoffe eingewickelt und oft noch in Körbe gelegt.

Bislang haben die Archäologen keine Trinkwasserquelle gefunden. Aber einige Wohnungen verfügten über einen gesonderten Sanitärbereich; die Exkremente wurden von dort nach draußen getragen und den Abfallhaufen untergemischt, die es überall in der Stadt gab. Dicke Ascheschichten in diesen Müllgruben sorgten für ausreichende Sterilität. Die Häuser hielt man außerordentlich sauber, Essensreste oder Hausmüll lassen sich in den Fußböden kaum finden.

Obwohl Çatal Hüyük durch seine Anlage sehr leicht zu verteidigen war, scheint dieser Aspekt keine Rolle gespielt zu haben. Denn jegliche Spuren von Kampf und Krieg fehlen in den 1200 Jahren Siedlungsgeschichte, die bislang erforscht sind. Als wahrscheinlichste Erklärung für die gedrängte Bebauung gilt derzeit ein religiöses Motiv: Die Einwohner wollten so nahe wie möglich bei ihren Vorfahren begraben werden. Als der Platz zwischen den Häusern nach und nach schwand, blieb ihnen schließlich nur noch der Zugang über die Dächer.

Mit dieser ungewöhnlichen Bauweise war sicherlich auch eine sehr weit entwickelte soziale Regelung verbunden, musste ein jeder doch die Dächer seiner Nachbarn mitbenutzen, um zu seinem eigenen Haus zu gelangen. Nachdem in den vergangenen Jahren vor allem einzelne Häuser und damit die Lebensumstände von Familien im Vordergrund der Forschung standen, versuchen die Archäologen nun die Organisation der Stadt als Ganzes zu erfassen.



Verstorbene, zumeist in Hockstellung auf die Seite gelegt und in einem Korb verstaut, wurden unter den Fußböden und Schlafplattformen in den Wohnungen begraben. Der Kalklehm in den Böden über den Leichen und der Rauch der Herdfeuer sollten wahrscheinlich den Verwesungsgeruch dämpfen.

herum fanden die Archäologen Ansammlungen ausgekratzter Asche, Reste von Mahlzeiten und der Verarbeitung von Getreide. Offenbar – und dies ist noch keine sonderliche Neuigkeit – war der Herd tatsächlich der Ort der Essenszubereitung. Wenn das Modell der Arbeitsteilung zutraf, wäre dort also die Domäne der Frauen gewesen. Tatsächlich scheint ein Befund diese Vermutung zu bestätigen: Begräbnisse von Neugeborenen, zu denen die Mütter naturgemäß eine engere Bindung hatten als die Männer, liegen oft in der Nähe des Herds.

Männliche Maler

Doch auch dieses Bild ist so eindeutig nicht, denn in den Ascheresten findet man auch Obsidiansplitter in großer Zahl. Die aber fallen bei der Herstellung von Steinwerkzeugen an. Den Rohstoff erhielten die Bewohner Çatal Hüyüks übrigens aus Kappadozien in der zentralen Türkei; er wurde unter dem Fußboden in der Nähe des Herds gehortet und bei Bedarf hervorgeholt. Falls Handel und Werkzeugfertigung Männersache waren, erledigten sie ihre Aufgabe also nicht an einem besonderen Platz. Kurz und gut: Für eine geschlechtsspezifische Aufgabenteilung findet sich kein archäologischer Beleg.

Erst im Bereich der symbolischen Darstellung und der Kunst brach die Gleichstellung offenbar auf. Stellten die Figurinen stets üppige Frauen dar, zeigen die reichlich vorhandenen Wandmalereien meist Männer bei der Jagd, gekleidet mit Leopardenfellen, oder Tiere männlichen Geschlechts – etwa Stiere und Hirsche mit erigiertem Glied. Auch stammten die unzähligen Tierköpfe, die an den Innenwänden der Häuser hingen, großteils von wilden Stieren oder Schafsböcken. Diese maskuline Fokussierung der Kunst hat in Anatolien eine lange Tradition. Ausgrabungen in der älteren Siedlung Göbekli im Südosten der Türkei brachten fantastische Abbildungen von wilden Tieren zu Tage, oft mit aufgerichtetem Penis, sowie Steinphalli (siehe Spektrum der Wissenschaft, Spezial »Moderne Archäologie« 2/2003, S. 10).

Stiere und andere Großtiere wurden vermutlich auch bei Ritualen geopfert und verzehrt. Das lesen Rissa Russell von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) und Louise Martin von der Universität London aus Ansammlungen entsprechender Knochen. Denn bei alltäglichen Mahlzeiten wurden diese Tiere, den Überresten zufolge, seltener gegessen. Die Abbildungen von Männern und Stieren stellen möglicherweise solche Feste beziehungsweise Rituale dar. Gleiches gilt für die Tierschädel, die mit Gips modelliert, bemalt und in den Häusern aufgestellt wurden. Doch erinnern wir uns an das Ergebnis der Isotopenanalyse: Männer und Frauen aßen das Gleiche. Entweder fanden solche Festmähler nur sehr selten statt, sodass sie keinen Einfluss auf die Gesamternährung hatten, oder die Frauen haben daran teilgenommen.

Fruchtbarkeit und Figurinen

Lediglich in der Kunst, die mit der Jagd und den Festen assoziiert wird, zeigt sich also nachweislich ein Unterschied. Und wie steht es mit der mächtigen Frauenfigur auf dem Leopardenthron? Die zeugt jedenfalls von einem starken Frauenbild. Ein jüngerer Fund von Çatal Hüyük zeigt eine weibliche Figur, in deren Rücken ein wildes Saatkorn eingelassen ist (siehe Bilder unten). Auch die »Göttin« mit den Leoparden hatte diese Verbindung zum Ackerbau, wurde sie doch in einem Getreidebehältnis gefunden. Die wenigen Gemälde, die eindeutig Frauen abbilden, scheinen diese beim Sammeln von Pflanzen zu zeigen. Es fällt auf, dass der Vielzahl »männlicher« Kunst und Symbolik kaum »weibliche« Beispiele gegenüber stehen: Die Landwirtschaft spiel-



Der jüngste Fund einer weiblichen Figur von nur 2,8 Zentimeter Höhe hat ein Getreidekorn im Rücken. Dies wird ebenfalls als Symbol dafür gedeutet, wie wichtig Frauen in der Entwicklung des Ackerbaus in Çatal Hüyük waren.



JAMES MELLAART

Diese fast zwei Meter lange Darstellung eines riesigen Auerochsen nimmt die gesamte Wand eines Hauses ein. Im Verhältnis dazu scheinen die abgebildeten Menschen winzig. Das verdeutlicht möglicherweise die Ehrfurcht vor dem Tier, das vielleicht bei einem religiösen Ritual geopfert wurde.

te in diesem Bereich offenbar kaum eine Bedeutung. Zwar dürfte es unmöglich gewesen sein, sich in den Häusern aufzuhalten, ohne ständig einem Stierhaupt oder -gemälde ins Auge zu schauen. Doch den Kornspeichern ist zum Beispiel kein solches Symbol gewidmet. Auch Gefäße aus Keramik oder Korb, wichtig für die Aufbewahrung des Getreides, waren weder bemalt noch sonstwie dekoriert. Die künstlerischen Belege deuten also tatsächlich auf eine geteilte Welt hin, die eine dominiert von den Männern und ihren Aktivitäten rund um Jagd und wilde Tiere, und die andere, weniger oft dargestellte Welt um Frauen und Pflanzen.

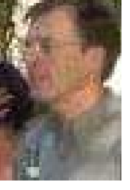
Diese Aufstellung von Befunden und Deutungen ist aber immer noch zu einfach, denn in den verschiedenen Siedlungsschichten zeichnet sich eine soziale Entwicklung ab. Die Figurinen der »Muttergöttinnen« stammen aus den jüngsten drei oder vier Schichten der insgesamt achtzehn. Auch wenn der Ackerbau und die Domestikation von Pflanzen bereits vor vielen Jahrhunderten erfunden wurden, zeigen die Kunst und die Überreste der Festmähler, dass die Jagd auf wilde Tiere lange einen höheren Stellenwert einnahm. Das Aufkommen der Frauendarstellungen mag tatsächlich darauf hinweisen, dass in jüngerer Zeit die Landwirtschaft eine zentralere Rolle im Leben der Gesellschaft einnahm und Frauen hierbei tatsächlich eine besondere Aufgabe zukam.

Kompetenzen der Geschlechter

Diese Schichten des Siedlungshügels dokumentieren auch sonst einen breiten Wandel. Große Öfen wurden außerhalb der Wohnräume in Innenhöfen errichtet, was auf eine Spezialisierung in der Essensverarbeitung hindeuten könnte. Mit Sicherheit nahm das Expertentum bei der Herstellung von Steinwerkzeugen und Töpferwaren zu. Zusätzlich kamen Stempelsiegel auf, was auf einen erhöhten Sinn für Eigentum schließen lässt.

Über Jahrhunderte hinweg hatte das Geschlecht in Çatal Hüyük wenig Einfluss darauf, was man im Leben erreichen konnte. Männer wie Frauen konnten eine Reihe von Rollen ausfüllen und eine Bandbreite von Positionen innehaben, von der Werkzeugherstellung über das Mahlen von Getreide und dem Backen bis hin zur Führung des Haushalts. Lediglich im Bereich der Jagd dominierten Männer, doch nichts weist darauf hin, dass sich dieser Einfluss auf andere Lebensbereiche erstreckte. Und auf jeden Fall bekam diese männliche Dominanz Konkurrenz, als einige Jahrtausende nach der Domestikation des Getreides der Ackerbau eine größere Rolle im Leben der Gemeinschaft zu spielen begann. An diesem Punkt, das verdeutlichen die Skulpturen, gewannen Frauen eine neue Kompetenz: die Aufzucht und Hege von Pflanzen. Hatte diese Dominanz irgendeine Auswirkung auf andere Bereiche des Lebens? Gab es womöglich in den jüngeren Phasen Çatal Hüyüks ein Matriarchat? Die oberen Schichten des Siedlungshügels sind noch wenig untersucht und – wie gesagt – das Gelände ist ohnehin eigentlich kaum erschlossen. Die Zukunft bleibt spannend. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Ian Hodder promovierte an der Universität Cambridge und war dort von 1977 bis 1999 Professor für Archäologie, bis er an die Universität Stanford wechselte. Er ist heute Vorsitzender des Department of Cultural and Social Anthropology in Stanford und Ausgrabungsleiter in Çatal Hüyük. Hodder ist einer der führenden Theoretiker in der Archäologie.

Stable isotope evidence of diet at Neolithic Çatalhöyük, Turkey. Von M. P. Richards et al., in: Journal of Archaeological Science 30, 67-76, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

BIERBRAUEREI

Hopfen und Malz – Gott erhalt's

Nur vier Dinge braucht der Brauer: Malz, Wasser, Hopfen und Hefe. Doch der Weg zum Bier ist weit.

Von Günther Thömmes und Joachim Schüring

Mit einer Verordnung unterband der Bayernherzog Wilhelm IV. 1516 manche obskure Braupraxis und begründete das »Deutsche Reinheitsgebot«. Seitdem darf Bier hier zu Lande nur aus den Grundstoffen Gerste, Hopfen und Wasser hergestellt werden. Und natürlich mit Hilfe von Hefe, die auch damals schon für Gärung sorgte, von deren Existenz aber noch niemand wusste: Sie wurde nicht zugesetzt, sondern war in der Luft der Gärkeller allgegenwärtig.

Bevor aus Gerste Bier werden kann, muss sie gemälzt werden. Dazu wird das Getreide in Wasser eingeweicht und zum Keimen gebracht. In den nächsten Tagen entstehen Enzyme, die später Stärke in Zucker umwandeln sollen – in der Natur ernährt sich davon die keimende Pflanze. Doch bevor diese Moleküle aktiv werden, kommt das »Grünmalz« zum Trocknen auf die Darre, wo die Keimung gestoppt wird. Je nachdem, wie lange und wie heiß die Luft über die Körner streicht, entsteht helles bis dunkles Malz, später dementsprechend helleres oder dunkleres Bier.

In der Brauerei wird das Malz geschrotet, in der Maischpfanne mit Wasser zu einem Brei vermischt und stufenweise erwärmt. Bei bestimmten Temperaturen – dem ein- oder zweistündigen Rasten – kommen die erwähnten Enzyme in Gang und die Maische wird allmählich süßer. Neben der Verzuckerung laufen noch eine Vielzahl anderer biochemischer Reaktionen ab, wobei wichtige Nährstoffe für die Hefe entstehen – ebenso Stoffe, die für ansehnlichen Schaum sorgen werden.

Sind die Stärkemoleküle vollständig in Zucker umgewandelt, wird die Maische in den Läuterbottich überführt. Auf einem Filterboden bleiben dort die unlöslichen Malzbestandteile zurück. Diese Treber sind wertvolles Viehfutter.

Anschließend fließt die so gewonnene Würze in die Sudpfanne, wo sie gekocht und mit Hopfen *(Humulus lupulus)* versetzt wird. Der Hopfen wurde in einem Text des Jahres 768 zum ersten Mal erwähnt. Lange Zeit diente er allein dazu, Bier haltbar zu machen. Denn seine Bitterstoffe hemmen Milchsäurebakterien, die vor der Pasteurisierung der größte Feind des Biers waren. Heute gibt es Dutzende von Hopfensorten mit unterschiedlichem Bitterstoffgehalt, und es liegt ganz in der Kunst des Braumeisters, welche er wann der Würze zugibt, um den gewünschten Geschmack zu erreichen.

Im Kühlhaus beginnt dann das Werk der zugegebenen Hefen. Vor der Erfindung der Kältemaschine im Jahr 1873 durch Carl von Linde wurden fast nur »obergärige« Biere gebraut. Denn die Hefeart *Saccharomyces cerevisiae* fühlt sich besonders wohl, wenn die Temperaturen nicht unter 15 Grad Celsius sinken. Und sie neigt dazu, sich nach getaner Arbeit an der Oberfläche der Würze anzureichern, daher der Name. Altbiere, Weizenbiere und das Kölsch gehören zu den bekanntesten obergärigen Sorten.

Die untergärige *Saccharomyces carlsbergensis* benötigt hingegen Temperaturen unterhalb von zehn Grad Celsius und setzt sich nach der Gärung am Boden des Gefäßes ab. Früher konnten solche Biere nur im Winter gebraut werden. Heute wird hier zu Lande der weitaus größte Teil des Biers – dazu gehören Pils, Export und Märzen – untergärig gebraut.

Die Hefe verbraucht zunächst den Sauerstoff in der Würze zum aeroben Wachstum und schaltet nach einigen Stunden auf den anaeroben Stoffwechsel um, die eigentliche Gärung. Erst jetzt setzt sie Zucker in Alkohol um. Dabei entstehen zudem Kohlendioxid und Wärme, aber auch Substanzen, die den »dicken Kopf« am nächsten Morgen verursachen.

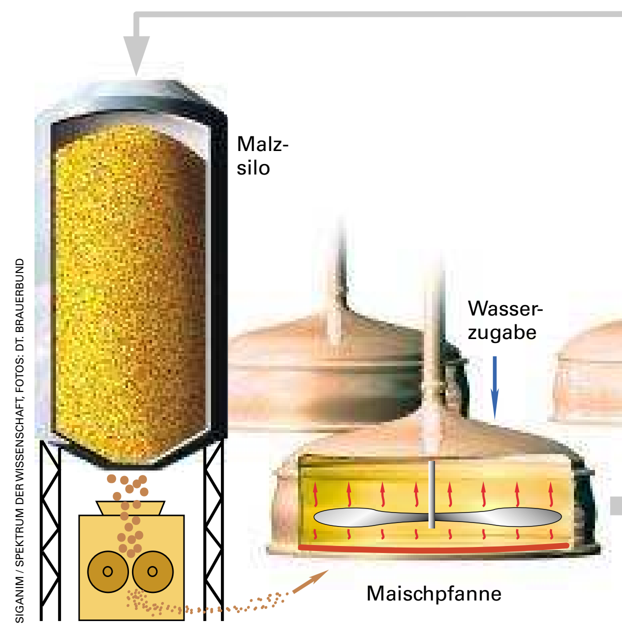
Die Gärung ist beim obergärigen Bier schon nach zwei bis drei Tagen abgeschlossen. Untergärige Biere müssen hingegen mehrere Wochen lagern, bevor sie gefiltert und schließlich unter Druck in Flaschen abgefüllt werden. ◁

Günther Thömmes ist Diplombraumeister in Wien. Seine liebsten Biere: das Sierra Nevada Pale Ale aus Kalifornien, ein gut gezapftes Budweiser-Budvar, ein frisches Paulaner Weißbier und ein kühles Bitburger. **Joachim Schüring** ist Redakteur bei »Abenteuer Archäologie« und trinkt am liebsten Selbstgebrautes.

Gerste



Mälzen



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, FOTOS: DT. BRAUERBUND

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Vor der Erfindung der Kältemaschine wurde im Frühjahr noch einmal ein letztes Bier gebraut. Dieses war stärker, damit es länger hielt und die bierfreie Sommerpause so kurz wie möglich war. Das Bier wurde nach dem Monat, in dem es gebraut wurde, **Märzen** genannt.

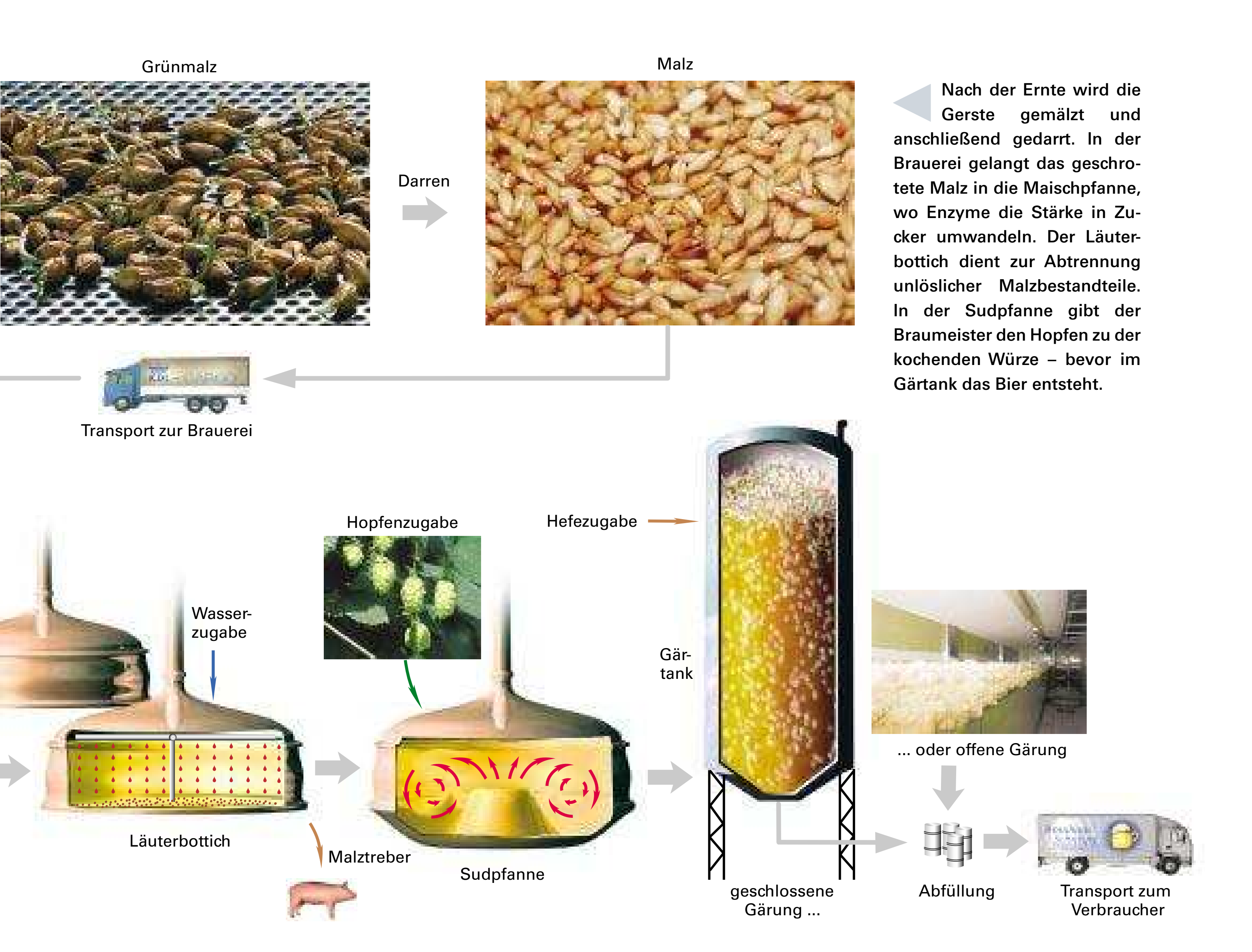
▶ Die erste **Bierdose** wurde 1935 in der Brauerei Krüger in Newark, New Jersey, befüllt.

▶ Der Name **Bockbier** leitet sich vermutlich von der norddeutschen Stadt Einbeck ab, wo seit dem 14. Jahrhundert Bier gebraut wird. In Bayern hieß es zunächst »Ainpöckisches Bier«, dann »Ainpockbier« und schließlich »Oanbock«.

▶ Angeblich hat ein Kulmbacher Brauergeselle in einem Winter vor gut 100 Jahren ein Bierfass im Hof einfrieren lassen. Doch gefroren war nur der Wasseranteil, während das konzentrierte Bier flüssig blieb. Seither gibt es den **Eisbock** mit einem Alkoholgehalt von 9 Prozent.

▶ **Altbier** ist nicht alt, sondern lediglich auf »alte« – nämlich obergärige – Art vergoren.

▶ **Der deutsche Biertrinker** liegt im internationalen Vergleich auf Platz drei. Er konsumiert über 120 Liter pro Jahr. Durch die irischen Kehlen fließen gut 150 Liter, die Tschechen bringen es gar auf rund 160 Liter.

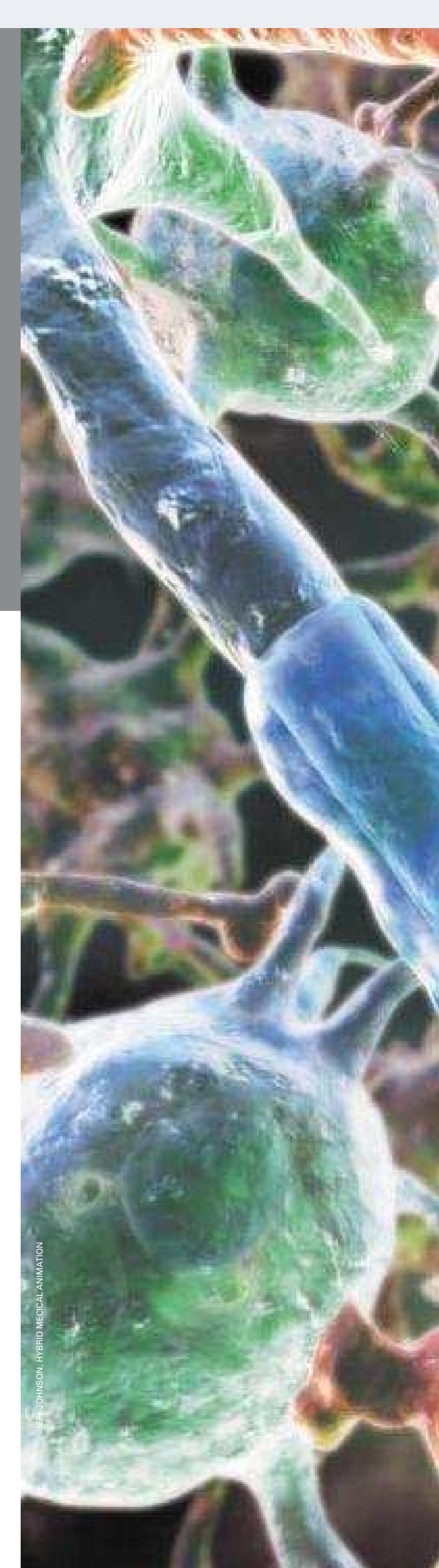


Nach der Ernte wird die Gerste gemälzt und anschließend gedarrt. In der Brauerei gelangt das geschrotete Malz in die Maischpfanne, wo Enzyme die Stärke in Zucker umwandeln. Der Läuterbottich dient zur Abtrennung unlöslicher Malzbestandteile. In der Sudpfanne gibt der Braumeister den Hopfen zu der kochenden Würze – bevor im Gärtank das Bier entsteht.

Die unbekannte Seite des Gehirns

Wie Gliazellen im Kopf mitreden

Lange stand die so genannte Glia im Schatten der Neuronen, galt sie doch vor allem als Stützstruktur im Gehirn. Doch sie scheint vieles zu beeinflussen – sogar, wie das Gehirn denkt, lernt und sich erinnert.



JEFF JOHNSON, HYBRID MECICAL ANIMATION

Neunmal so viele Gliazellen (rötlich) wie Nervenzellen (blau) arbeiten im menschlichen Gehirn. Ihre Fähigkeiten bei der Informationsverarbeitung haben Neurowissenschaftler bisher weit unterschätzt.

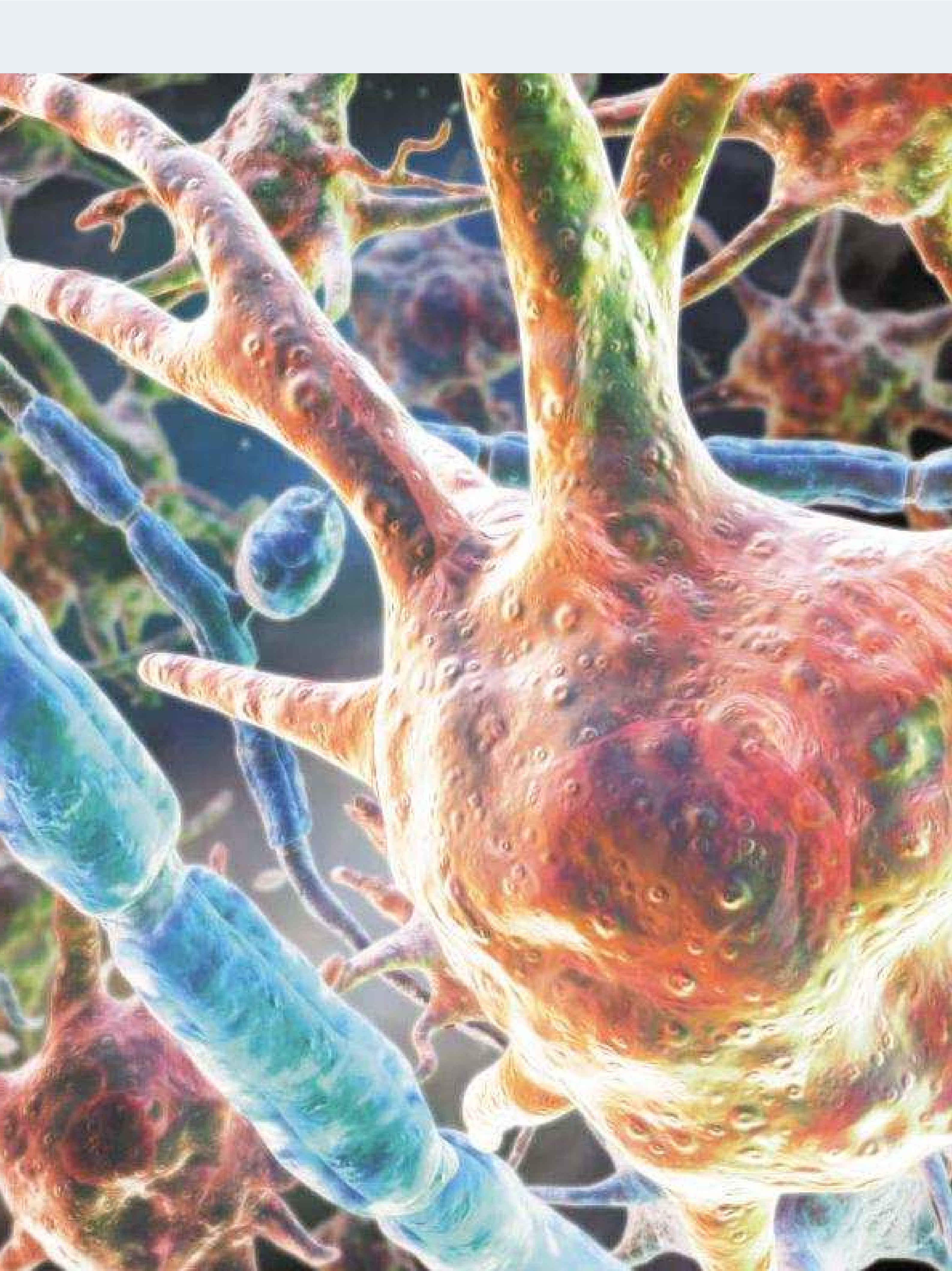
Von R. Douglas Fields

Albert Einsteins Gehirn lag jahrzehntelang in zwei Marmeladentöpfen, konserviert und in Scheiben zerteilt. Die Gefäße hütete der ehemalige Pathologe Thomas Harvey – ohne dass die Welt dies ahnte. Der einstige Mediziner in Princeton, Einsteins letzter Wirkstätte, hatte das Denkorgan des genialen Physikers wenige Stunden nach dessen Tod 1955 entnommen und bei vielen Ortswechseln stets mit sich geführt. Harvey war aber nie dazu gekommen, Einsteins Hirn zu untersuchen.

Ende der 1970er Jahre entdeckten Journalisten die Spur. Doch erst vor wenigen Jahren konnte der amerikanische Wissenschaftsautor Michael Paterniti den inzwischen über neunzigjährigen Harvey überreden, die Reste des Hirns einer Enkelin Einsteins zu übergeben. So reiste das Gehirn des Schöpfers der Relativitätstheorie quer durch die USA, verpackt in ein Tuppergefäß im Kofferraum eines alten Buick – nachzulesen in Michael Paternitis Buch »Unterwegs mit Mr. Einstein« (im Original »Driving Mr. Albert«).

Nach der Wiederentdeckung bewarben sich viele seriöse Hirnforscher, aber auch Pseudowissenschaftler um Proben des »Jahrhundertgehirns«, so die Neuroanatomin Marian C. Diamond von der Universität von Kalifornien in Berkeley. Die Gliaexpertin erhielt von Harvey Anfang der 1980er Jahre nach vielen vergeblichen Anfragen einige winzige Stücke von Einsteins Hirn. Sie stammten aus Assoziationszentren der Stirn- und Schläfenregion. Diamond untersuchte daran die Zahl der Glia- im Verhältnis zu Nervenzellen, den Neuronen. Wie sie bald erkannte, besaß Einstein an betreffender Stelle besonders viel »Nervenleim« oder »-kitt« – nichts anderes bedeutet »Neuroglia« (Glossar S. 51).

Dieser Befund könnte wichtiger sein, als es zunächst schien. Erst seit kurzem erkennt die Hirnforschung, dass sie die Bedeutung der Gliazellen für die geistigen Funktionen unterschätzt hat. Bisher galten Neuronen als fast allein verantwortlich für Denken und Lernen. Zwar enthält das menschliche Gehirn neunmal so viele Glia- wie Nervenzellen, und über die Hälfte der Zellmasse besteht aus Glia. Doch Neurowissenschaftler ▷



▷ glaubten, die Glia würde die Nervenzellen einfach nur umsorgen – etwa ihnen Nährstoffe von den Blutgefäßen zuführen, sich um das richtige Elektrolytmilieu kümmern oder Immunschutzfunktionen wahrnehmen. Dank dieser stillen Helfer, so die überkommene Ansicht, könnten sich die Nervenzellen ganz ihrer spezifischen Aufgabe widmen: sich über »Synapsen«, die winzigen Kontaktpunkte ihrer Kommunikationsnetze, austauschen – mit dem Ergebnis, dass wir denken, uns erinnern oder freuen.

Sollte zukünftige Forschung neue Hinweise auf eine Teilnahme der Glia an der Kommunikation zwischen Nervenzellen bestätigen, dann müssten wir gründlich umlernen. In den letzten Jahren konnten Hirnforscher darstellen, sogar filmen, dass Nerven- und Gliazellen miteinander in regem Austausch stehen. Das geschieht schon beim Embryo und noch im reifen Gehirn, mit wichtigen Folgen. Offensichtlich nimmt die Glia auf die Synapsenbildung Einfluss. Sie bestimmt auch mit, welche dieser neuronalen Kontaktstellen an Stärke gewinnen oder abgeschwächt werden. Derartige Veränderungen sind für Lernen und Erinnern bedeutsam.

Steigerung der Denkkraft

Nach den neuesten Befunden der Forscher kommunizieren Gliazellen auch miteinander – sogar wesentlich. Neben dem Netzwerk der Neuronen steht anscheinend ein zweites, das die Gliazellen unterhalten. Dieses arbeitet, so sieht es aus, parallel zu jenem der Nervenzellen und fördert die Gehirnleistung.

Noch bewerten Neurowissenschaftler diese faszinierenden Daten eher vorsichtig. Dass die Forschung bisher praktisch die Hälfte des Gehirns übersehen haben könnte, sorgt in der Zunft für einige Furore. Möglicherweise erwartet die Forscher in diesem vernachlässigten Bereich ein Fundus neuer Informationen über die Funktionsweise unseres Denkapparats.

Die meisten Menschen stellen sich unter dem Nervensystem ein Gewirr von Leitungen für elektrische Impulse vor, und diese Leitungen verkabeln die Nervenzellen miteinander. Das Bild ist nicht falsch, nur unvollständig. Liefert ein Neuron an ein anderes ein Signal, erzeugt es zunächst einen elektrischen Impuls – ein Aktionspotenzial. Ein solcher Impuls läuft über das Axon – einen speziellen, oft sehr langen Ausläufer der Nervenzelle – zu Synapsen am Ende des Axons.

Zum Empfang solcher Botschaften dienen der Nervenzelle kürzere Fortsätze, die Dendriten. Am Axonende wird das Aktionspotenzial in ein chemisches Signal umgesetzt: Das Axon schüttet einen neuronalen Botenstoff (»Neurotransmitter«) in den schmalen synaptischen Spalt. Der Botenstoff diffundiert zur korrespondierenden Empfangsstelle des anderen Neurons, wo nun wiederum ein elektrisches Signal für die Empfängerzelle entsteht.

Allerdings herrscht um die Neuronen, ihre Axone und Synapsen herum nicht etwa Leere. Dort drängen sich vielmehr verschiedene Typen von Gliazellen. Zwar ahnten Neurophysiologen bereits in der Zeit von Einsteins Tod, dass auch die Gliazellen an der Informationsverarbeitung beteiligt sind. Die Beweise dazu fehlten den Forschern aber. So geriet der »Nervenleim« in den Schatten der Neurowissenschaft. Modelle zur Nerven- und Hirnfunktion berücksichtigten die Glia nicht.

Teilweise hing das mit den nicht genügend empfindlichen Analysemethoden zusammen. Doch hauptsächlich suchten die Forscher einfach das Falsche. Falls Gliazellen bei der Nervenarbeit mitredeten, so die Erwartung damals, sollten sie ähnlich wie Nervenzellen agieren – also über elektrische Impulse, Neurotransmitter und Synapsen.

Wie wir heute wissen, erfüllt Glia tatsächlich einige der Voraussetzungen für eine solche Kommunikation. Physiologen entdeckten in den Außenmembranen von Gliazellen teilweise ähnliche spannungsempfindliche Ionenkanäle wie auf Axonen, die dort für Aktionspotenziale wichtig sind. Das sprach dafür, dass die Glia zumindest Neuronenaktivitäten aus ihrer Nähe registrieren kann. Doch Membraneigenschaften, um darauf mit eigenen Spannungspulsen reagieren zu können, schienen zu fehlen. Erst heute hat die Neurophysiologie erkannt, dass Gliazellen nicht mit elektrischen Impulsen arbeiten, sondern mit chemischen Signalen.

Glia horcht an Nervenzellen

Mitte der 1990er Jahre gab es neue Einblicke, wie die Glia neuronale Aktivität erfasst. Kurz zuvor hatten Forscher entdeckt, dass Gliazellen an ihrer Außenmembran Rezeptoren, also Erkennungsstrukturen für eine Reihe von Substanzen tragen – darunter auch Antennenmoleküle für neuronale Botenstoffe. Kommunizierte die Glia vielleicht in ihrem Netz mit eigenen Botenstoffen, sprach aber gelegentlich auch direkt auf neuronale Signale an?

Zunächst galt es aber zu klären, ob Gliazellen tatsächlich dem Gespräch von Neuronen lauschen und dann auch selbst Signale liefern. Es gab Hinweise, dass in stimulierte Gliazellen Kalzium einfließt – genauer gesagt: positiv geladene Kalzium-Ionen. Der Einstrom, der sich mit raffinierten Verfahren beobachten lässt, kann eine Aktivierung der Glia anzeigen. Bei dieser Untersuchungsmethode fluoreszieren in den Zellen Moleküle, sobald sie sich an Kalzium binden.

Die Technik machten sich Forscher nun bei Gliazellen zu Nutze, welche die Synapsen außerhalb des Zentralnervensystems zwischen Nerv und Muskelzelle umkleiden. Und wirklich reagierten diese »terminalen Schwannzellen« bei Befehlen der Nerven an die Muskeln unter anderem mit Kalziumeinstrom – ein Indiz, dass sie das Signal des Nervs an die Muskelzelle registrierten. Da stellte sich die Frage: Würde sich die Reaktion nur auf Synapsen beschränken? Vielleicht war die Erscheinung einfach ein Neben-

IN KÜRZE

▶ Bis vor wenigen Jahren glaubten Neurowissenschaftler, die **Kommunikation im Nervensystem** würden allein die Nervenzellen leisten. Die Gliazellen (nach griechisch *glia* = Leim, Kitt), die im menschlichen Gehirn neunmal häufiger vorkommen, sollten demnach rein für deren Versorgung zuständig sein.

▶ Wie sich immer deutlicher abzeichnet, kommunizieren Gliazellen sowohl mit Neuronen als auch untereinander. Sie »hören« Nervensignale und nehmen Einfluss auf die **Signalübertragung an Synapsen**, den Kontaktstellen zwischen Nervenzellen. Sie können sogar darauf einwirken, wo Synapsen wachsen.

▶ Gliazellen bestimmen vermutlich **Lernen und Gedächtnis** entscheidend mit. Ihr Einfluss geht bis hin zur Reparatur von Nervenschäden.

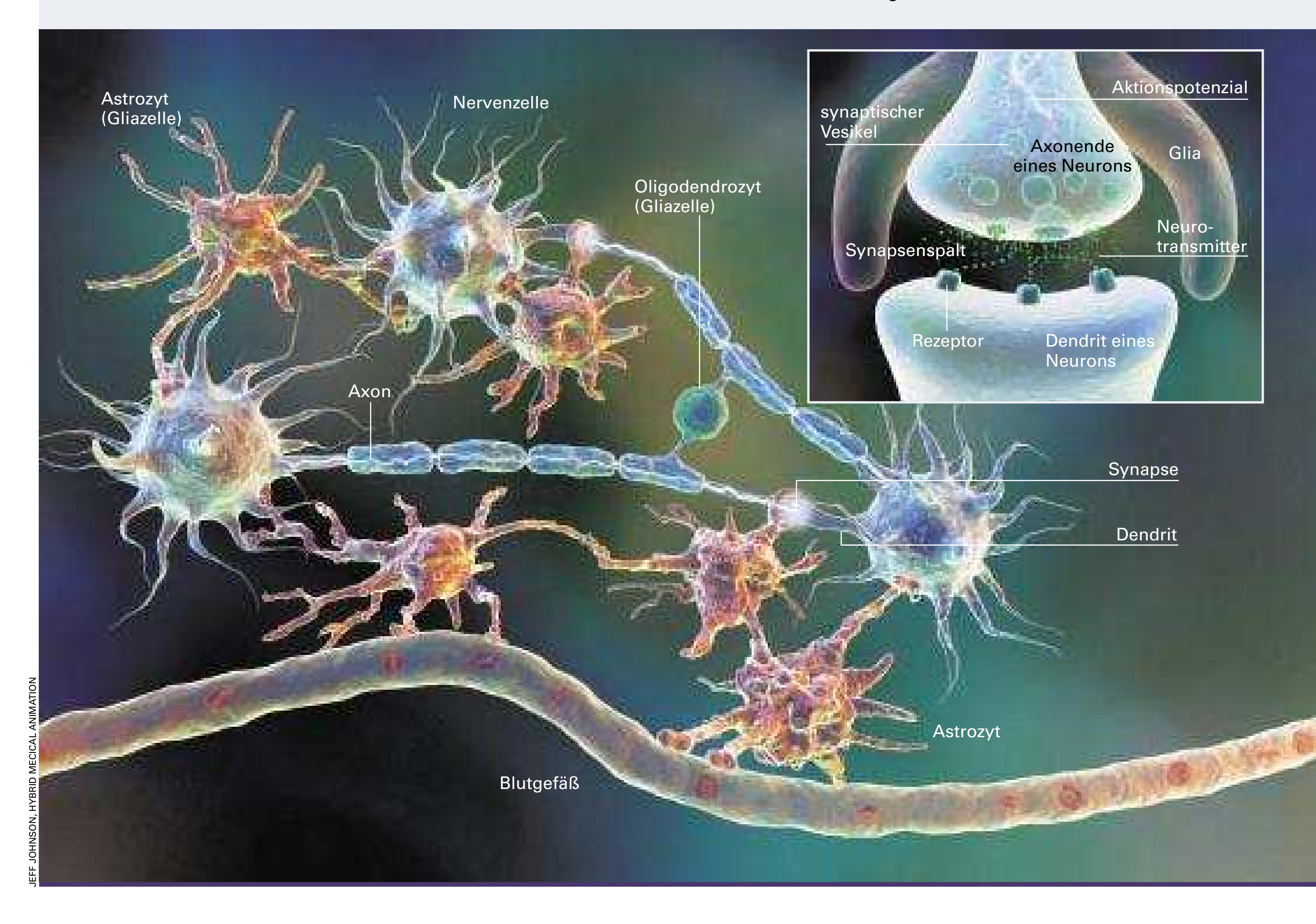
Allgegenwart der Glia

Glia- und Nervenzellen (Glossar S. 51) arbeiten in Gehirn und Rückenmark eng zusammen. So gut wie überall, wo Nervenzellen agieren, scheint die allgegenwärtige Gliafraktion beteiligt:

Glia umkleidet Synapsen (kleines Bild). Sie umhüllt die langen Axone, über die Nervenzellen Impulse senden. Sie bildet auch Brücken zwischen Axonen.

An all diesen Stellen belauschen Gliazellen die Gespräche der Neuronen und versenden dann eigene Signale. So beeinflussen sie insbesondere die Signalstärke an Synapsen.

Nicht zuletzt gehört zu ihren Aufgaben aber nach wie vor, den Neuronen das richtige Umgebungsmilieu zu bereiten und sie mit Nährstoffen zu versorgen.



JEFF JOHNSON, HYBRID MECICAL ANIMATION

effekt durch aus dem Synapsenspalt entwischte Botenstoffe, welche die Glia auffing.

In meinem Labor bei den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) wollten wir herausfinden, wie sich jene Gliazellen verhalten, welche die Axone umhüllen. Die schnell leitenden Nerven sind von elektrisch isolierenden Gliamembranschichten umwickelt. Im peripheren Nervensystem leisten das »Schwannzellen«, im Zentralnervensystem – Rückenmark und Gehirn – die »Oligodendrozyten«.

Wir kultivierten sensorische Neuronen aus Hinterwurzelganglien des Rückenmarks von Mäusen. Zu einigen Präparaten fügten wir Schwannzellen hinzu, zu anderen Oligodendrozyten. Die Kulturen zogen wir in speziellen, mit Elektroden versehenen Schalen, sodass wir die Axone durch elektrische Reizung zwingen konnten, Aktionspotenziale hervorzubringen.

Aktive Gliazellen im Film

Nun kam es darauf an, die Aktivität der Axone und möglicherweise der Gliazellen getrennt zu messen sowie die zeitliche Abfolge und Intensität der Reaktionen zu erfassen. Dafür wollten wir eine Form der erwähnten Kalziumdarstellung nutzen. Die Methode erlaubt zu verfolgen, ob und wie stark einzelne Zellen nacheinander ansprechen. Sobald Kalzium in eine Zelle einströmen würde, müsste diese aufleuchten. Zellen können bei Stimulation auch selbst aus inneren Speichern Kalzium freisetzen. Je mehr Ionen in die Zelle gelangen, desto heller scheint sie. In unserem Versuch digitalisierten wir die Bilder der aufglühenden Zellen und stellten sie in Echtzeit und Falschfarben – als Maß für die Intensität – auf einem Bildschirm dar. Das wirkt ähnlich wie bewegte Radarbilder von Regenfronten bei der Wettervorhersage. ▷

▷ Dass die Neuronen aufleuchten würden, war zu erwarten. Bei einem Aktionspotenzial öffnet die Außenmembran der Nervenzelle spannungsempfindliche Ionenkanäle, über die Kalzium einströmt. In dem Experiment sollte dann die ganze Nervenzelle wie von innen her glühen. Was aber würden die Gliazellen machen? Würden sie die Nervenimpulse bemerken? Und würden wir das erkennen? Wenn überhaupt, so vermuteten wir, sollten sie verzögert reagieren.

Nach monatelanger Vorbereitung saßen meine Kollegin Beth Stevens und ich im abgedunkelten Labor vor dem Monitor. Die nächsten Augenblicke würden über unsere Hypothese entscheiden. Wir schalteten den Stimulationsapparat ein. Sofort begannen die Neuronen zu erstrahlen, zuerst blau, dann grün, rot und schließlich weiß, mit höchster Intensität. Das bedeutete, dass viel Kalzium einströmte und sie über ihre Axone elektrische Impulse schickten.

Bei den Gliazellen entlang der Axone tat sich für uns endlos lange scheinbar gar nichts. Doch dann, nach ungefähr fünfzehn Sekunden fortwährender Reizung der Neuronen, begannen sie plötzlich eine nach der anderen wie eine Lichterkette zu erglimmen (Bilder rechts). Augenscheinlich hatten sie die Impulse in den Axonen irgendwie bemerkt, und nun sprachen sie darauf an. Sie reagierten, indem sie den Kalziumspiegel in ihrem eigenen Inneren erhöhten.

Der Befund bestätigte, dass Gliazellen neuronale Impulse wahrnehmen. Das warf zwei Fragen auf: Wie können sie überhaupt elektrische Impulse erkennen, die über ein Axon rasen? Und welche Prozesse setzt der Kalziumstoß in einer Gliazelle in Gang? In Neuronen aktiviert Kalzium Enzyme, die dann Neurotransmitter auf den Plan bringen. Vermutlich werden in den Gliazellen durch das Kalzium ebenfalls irgendwelche Enzyme mobilisiert. Nur – zu welchem Zweck geschieht das?

Lauschen an Synapsen

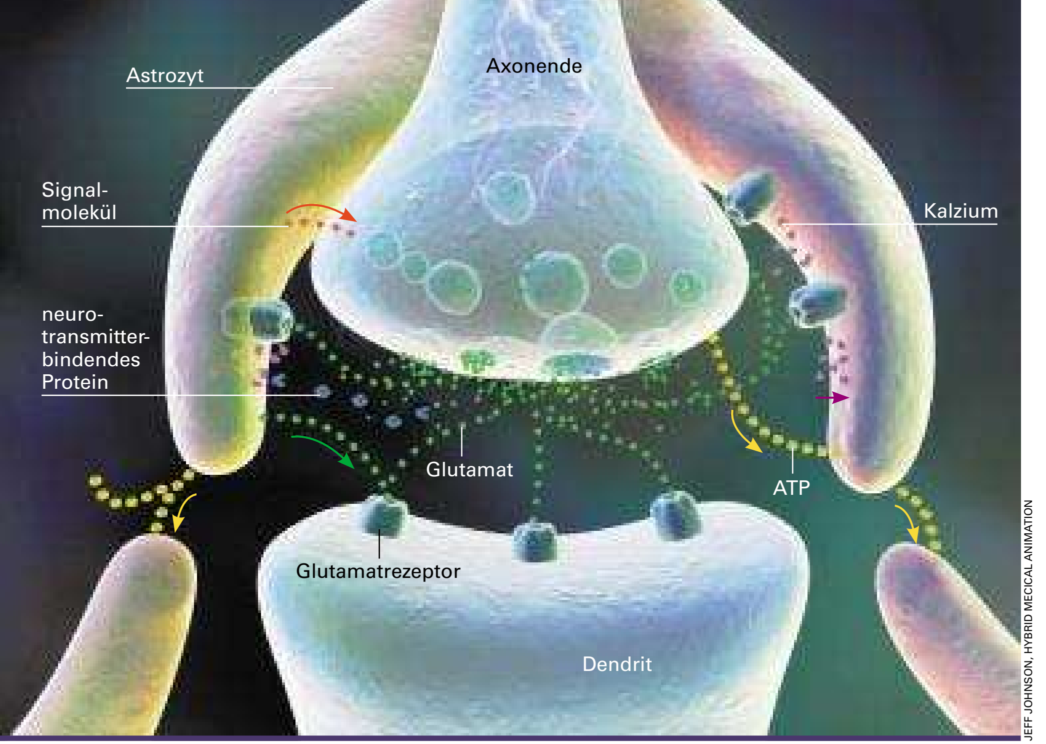
An Synapsen geht es fast zu wie bei dem Kinderspiel »Stille Post«. Gliazellen – in dem Fall Astrozyten – hören zu, was die Neuronen sich erzählen, und sagen das einander weiter. Sie teilen den Neuronen anschließend praktisch auch mit, wie die Botschaft wirklich lauten soll.

Über Synapsen an ihren Axonenden verschicken Neuronen an andere Nervenzellen Neurotransmitter – hier zum Beispiel den Botenstoff Glutamat. Auch die synapsenumlagernden Astrozyten erkennen diese Moleküle mittels spezifischer Rezeptoren.

Außerdem registrieren die Astrozyten die Signalsubstanz ATP, welche das sendende Neuron gleichfalls freisetzt. Glutamat wie auch ATP bewirken bei der Gliazelle einen Einstrom von Kalzium-Ionen. Hieraufhin verschickt der Astrozyt selbst ATP. Andere Astrozyten, die das registrieren, werden nun ebenfalls aktiv.

Indem eine Gliazelle in den Synapsenspalt denselben Neurotransmitter freisetzt wie das Neuron, kann sie eine Nachricht verstärken. Abzuschwächen vermag sie diese, wenn sie Moleküle davon abfängt oder mit abgesonderten Proteinen unwirksam macht.

Die Astroglia vermag mit Signalsubstanzen (roter Pfeil) sogar auf das Axonende so einzuwirken, dass es zukünftig bei Nervenimpulsen mehr – oder auch weniger – Neurotransmitter ausschüttet, also eine stärkere beziehungsweise schwächere Botschaft abliefert. Da sich beim Lernen wahrscheinlich Synapsenstärken verändern, dürften Gliazellen mitbestimmen, ob und wie sich Erfahrungen im Gehirn manifestieren.



JEFF JOHNSON, HYBRID MECICAL ANIMATION

Eine Welle der Kommunikation

Einige Anhaltspunkte dazu lieferten frühere Arbeiten an »Astrozyten«, dem häufigsten Gliazelltyp des Gehirns. Unter anderem ist es Aufgabe der Astroglia, den Nervenzellen Energie zuzuführen – aus Nährstoffen, die sie den Blutkapillaren entnehmen. Sie sorgen außerdem im Umfeld der Neuronen für das richtige Ionen- und damit Elektrolytmilieu, die Voraussetzung für Nervenimpulse. In dem Zusammenhang müssen die Astrozyten an Synapsen überschüssige Neurotransmitter und Ionen abfischen, die Impulse erzeugende Nervenzellen freisetzen.

Eine richtungweisende Studie über die Astrozyten erschien 1990. Sie stammte von einer Gruppe an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) um Stephen J. Smith, der jetzt an der Universität Stanford (Kalifornien) arbeitet. Die Forscher wiesen nach, dass in der Zellkultur die Kalziumkonzentration in Astrozyten plötzlich anstieg, wenn man in das Gefäß den Botenstoff Glutamat gab. Doch damit nicht genug: Die Reaktion ging wie eine Welle über die gesamte Astroglia in der Laborschale. Es war, als hätte ein feuerndes Neuron das Glutamat freigesetzt, die Gliazellen würden

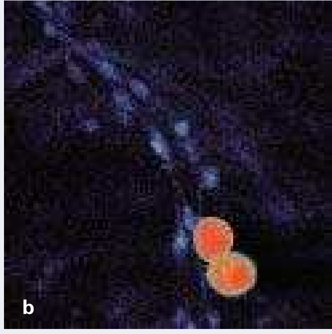
Aufleuchtende Gliaketten

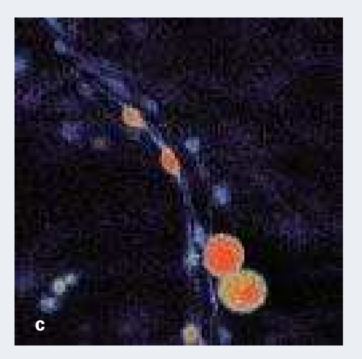
Diese nachträglich kolorierten Filmaufnahmen entstanden per Konfokalmikroskopie mit Laserabtastung. Sie zeigen zwei sensorische Neuronen von zwanzig Mikrometer Durchmesser (große runde Körper unten auf den Bildern) zusammen mit vielen Schwannzellen (kleinere Körper) in der Zellkultur – Schwannzellen bilden Glia im peripheren Nervensystem (a). Die Zellen enthielten eine Substanz, die zusammen mit Kalzium fluoresziert.

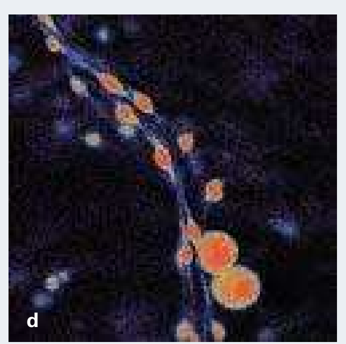
Gleich nachdem die Neuronen künstlich gereizt worden waren und Aktionspotenziale über ihre Axone (lange dünne Linien) schickten, leuchteten ihre Zellkörper auf (b). Leicht erkennbar, war durch geöffnete Membrankanäle dem Nährmedium zugegebenes Kalzium in sie eingeströmt.

Nach zwölf Sekunden fortdauernder Neuronenimpulse begannen auch die Schwannzellen eine nach der anderen aufzuleuchten (c). Achtzehn Sekunden später säumte eine Lichterkette die Axone (d). Das bedeutet: Die Glia, die lange Nervenzellausläufer des peripheren Nervensystems umhüllt, hört auch die weiten Übertragungswege quer durch den Körper ab.









den anderen die Botschaft weitersagen und alle würden das Ereignis bereden.

Nur: Wie tauschen Astrozyten untereinander Informationen aus? Von einigen Forschern kam der Vorschlag, dass Kalzium-Ionen oder Signalmoleküle anderer Art einfach direkt von Zelle zu Zelle wandern – durch Poren, worüber benachbarte Gliazellen direkten Kontakt miteinander herstellen. Doch 1996 widerlegten S. Ben Kater und seine Kollegen von der Universität von Utah in Salt Lake City diese Idee. Mit einer scharfen Mikroelektrode trennten sie eine Astrozytenkultur in der Mitte in gerader Linie durch, sodass ein schmaler zellfreier Zwischenraum entstand. Die beiden Hälften in der Kulturschale hatten keinen direkten Zellkontakt mehr. Als die Forscher nun auf einer Seite eine Kalziumreaktion provozierten, schwappte die Welle trotz der Bresche ohne weiteres auf die andere Seite über. Das bedeutete: Die Astrozyten hatten sich verständigt, ohne dass sie einander berührten. Irgendwie hatten sie Signale abgegeben, die sich durch das Medium verbreiteten.

In den folgenden Jahren erhielten viele Forschergruppen Ergebnisse ähnlicher Art. Sie fanden nun auch erste Erklärungen für die geheimnisvolle Übertragung. Jetzt stand zumindest fest: Astrozyten antworten auf Neurotransmitter mit einer auf andere Zellen sozusagen überschwappenden Kalziumreaktion, gleich ob Neuronen den Botenstoff an Synapsen ausgeschüttet haben oder ob er künstlich zugesetzt wurde. In dieser Zeit entdeckten die Wissenschaftler auch, wie vorn erwähnt, dass Gliazellen Rezeptoren für viele jener Neurotransmitter besitzen, mit denen Neuronen an ihren Synapsen kommunizieren. Und die Forscher erkannten, dass Glia ebenfalls die meisten der für Nervenzellen typischen, für deren Aktionspotenziale unerlässlichen Ionenkanäle ausbildet.

Die Sache war einigermaßen verwirrend. Warum verhalten sich die Gliazellen trotz allem nicht so wie Neuronen? Bei ihrer Aktivierung stützen sich doch beide Zellsorten auf Kalziumfluten. Nur – bei den Nervenzellen lösen elektrische Impulse die Flut aus. Wie aber kommt sie bei Gliazellen zu Stande? Glia verzichtet nun einmal auf Aktionspotenziale. Auch von fremder Seite erhält sie keine elektrischen Signale. Ein anderer Mechanismus, vielleicht auch ein bisher unbemerktes elektrisches Phänomen schien hier beteiligt zu sein.

Hervorragendes Botenmolekül

Bei ihren Studien an Gliazellen waren die Forscher immer wieder auf ein gut bekanntes Molekül gestoßen: das Adenosintriphosphat oder ATP, das mit seinen Phosphatresten bei zellulären Prozessen die Energie liefert. ATP gibt aus mehreren Gründen zudem ein hervorragendes Botenmolekül für die Informa- ▷

GLOSSAR

▶ **Gliazellen** existieren in mehreren Sorten. Die häufigste Form im Gehirn sind die **Astrozyten**. Sie versorgen die Nervenzellen, stellen Verbindungen zwischen ihnen her und umkleiden die Synapsen. **Oligodendrozyten** umhüllen Axone von Hirnneuronen. Im peripheren Nervensystem leisten das die **Schwannzellen**. Die im Text nicht erwähnte Mikroglia hat Immunfunktion.

▶ Nervenzellen (= **Neuronen**) empfangen Signale von einander über **Dendriten** genannte Ausläufer. Sie versenden Botschaften über teils sehr lange Zellfortsätze, die **Axone**. Das Axon entlang laufen dann elektrische Impulse, **Aktionspotenziale**. An den **Synapsen** am Axonende wird das elektrische in ein chemisches Signal umgesetzt. Das Signal wird durch **Neurotransmitter** (Botenstoffe) übermittelt.

▷ tionsübertragung zwischen Zellen ab. So ist es im Zellinnern reichlich vorhanden, außerhalb dagegen nur wenig. Klein wie das Molekül ist, verteilt es sich rasch, und es wird schnell abgebaut. Diese Eigenschaften stellen sicher, dass eine neue ATP-Botschaft nicht mit alten Nachrichten verwechselt wird. Überdies liegt ATP sauber verpackt mitten unter den für die Synapsen gespeicherten Neurotransmittern an den Enden der Axone. Zusammen mit diesen kommt es frei, wenn das Axonende ein Signal weitergibt. Und das kleine Molekül kann den Synapsenspalt auch verlassen.

Tatsächlich hat ATP bei der Kommunikation der Astrozyten untereinander offenbar eine entscheidende Funktion als Signalmolekül. Wie Peter B. Guthrie und seine Kollegen von der Universität von Utah in Salt Lake City 1999 bewiesen, geben erregte Astrozyten die Substanz in ihre Umgebung ab. In der Zellpopulation löst das eine Kettenreaktion aus: Die ATP-Moleküle binden sich an Rezeptoren von benachbarten Astrozyten. Diese öffnen nun Ionenkanäle und Kalzium strömt ein. Nun setzten auch sie ATP frei – woraufhin wiederum die nächsten Astrozyten ansprechen und so fort.

Langsam begann sich nun eine Vorstellung zu entwickeln, wie die Glia, die ein Axon umhüllt, einen Nervenimpuls erfasst und die Information anderen Gliazellen bis zur Synapse am Axonende weitersagt. Was zunächst den zweiten Aspekt betrifft, so setzen nach diesem Modell Hüllzellen des Axons, wenn sie ein Aktionspotenzial bemerken, ATP frei. Dieses Molekül wird von der nächsten Zelle am Axon registriert. Sie zeigt ihrerseits eine Kalziumreaktion, gibt daraufhin ATP ab und so weiter, bis die Nachricht an der Synapse ankommt. So kann eine Information über Gliaketten größere Distanzen überwinden.

Signale vom Nerv an seine Hüllzellen

Die große Frage, wie die ersten Gliazellen dieses Signalwegs – also die Hüllzellen des Nervs – das Feuern des Neurons eigentlich bemerken, war jedoch immer noch offen. Axone haben, soweit man wusste, keine Synapsen mit Gliazellen. Entlang dem Axon besteht auch sonst in nächster Nähe keine solche Kontaktstelle. Neurotransmitter kamen als Boten also nicht in Betracht. Derartige Signalstoffe setzt ein Nerv ausschließlich im synaptischen Spalt frei. Keinesfalls treten sie woanders als nur am angezielten Kontakt zur nächsten Nervenzelle aus dem Fortsatz aus. Wäre das anders, drohte im Gehirn ein Signalchaos.

Unser Verdacht fiel wiederum auf ATP. Dass es an den Axonenden in den synaptischen Spalt gelangt, war bekannt. Entwich es etwa auch entlang dem Axon, wenn ein Impuls darüber raste? Diese These prüften wir mit reinen Kulturen von Hinterwurzelganglienzellen. Die Nährflüssigkeit versetzten wir mit dem Leuchtenzym von Glühwürmchen, dass zu seiner Aktion auf den Energielieferanten ATP angewiesen ist. Als wir dann die Axone reizten, sodass sie Aktionspotenziale erzeugten, leuchtete das Nährmedium jedes Mal auf. Offensichtlich war aus den Axonen ATP ausgetreten.

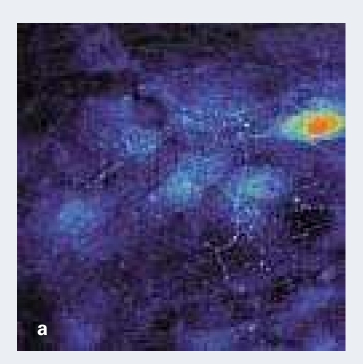
Als Nächstes fügten wir in die Gefäße Schwannzellen hinzu und maßen nach der vorn beschriebenen Methode deren Kalziumreaktion. Wiederum erhielten wir das erhoffte Resultat – diesmal aufleuchtende Gliazellen, das Zeichen für einen ansteigenden Kalziumpegel. Um abzusichern, dass wirklich das ATP die Reaktion veranlasst hatte, prüften wir schließlich noch den Effekt des Enzyms Apyrase. Es baut ATP sehr schnell ab. Nun blieben die Schwannzellen bei Aktionspotenzialen dunkel, offenbar weil kein ATP und damit keine Botschaft bei ihnen ankam.

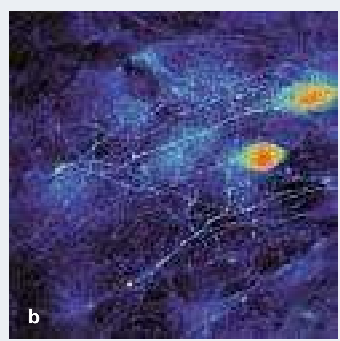
Somit war erwiesen: Feuernde Axone geben nicht nur an der Synapse, sondern auch entlang der Faser nach außen ATP ab. Die kleinen Moleküle lösen dann in der Glia um die Neuronenausläufer den Einstrom von Kalzium aus. Auch das weitere Geschehen im Zellinnern konnten wir mit anderen Untersuchungsverfahren verfolgen. Nach dem Eintritt von Kalzium wandern Signale von der Zellmembran zum Kern. Daraufhin schaltet die Zelle eine Reihe von Genen an. So

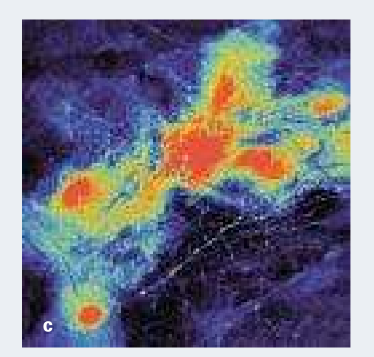
Kalziumwellen in Gliapopulationen

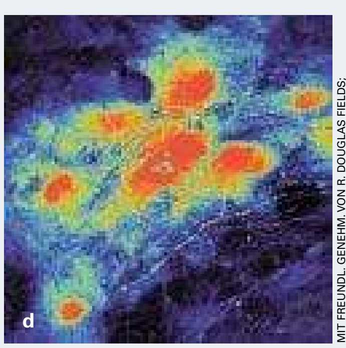
Gliazellen kommunizieren intensiv untereinander. Hier wurden Astrozyten (rot/gelb) und sensorische Neuronen (nicht sichtbar) in einem kalziumhaltigen Medium gezogen (a). Zellen, die Kalzium aufnahmen, leuchteten in diesem Experiment hell. Von den Nervenzellen sind nur die langen, feinen Axone zu sehen, die es während eines Aktionspotenzials geschossartig durchblitzt (b).

Auf Aktionspotenziale hin begannen auch Gliazellen zu scheinen. Sie hatten also die Nervenimpulse registriert und nahmen Kalzium auf (steigende Kalziumkonzentration von grün über gelb zu rot). Nach zehn beziehungsweise zwölfeinhalb Sekunden (c und d) fegten mächtige aufleuchtende Wellen über das Gliafeld. Die Botschaft schwappte über die Population.









MIT FREUNDL. GENEHM. VON R. DOUGLAS FIELDS; QUELLE: NACH SCIENCE, BD. 298, OKTOBER 2002 (R. D. FIELDS UND B. STEVENS-GRAHAM)

unglaublich dies klingt: Wenn eine Nervenzelle mit ihresgleichen kommuniziert, aktiviert sie zugleich Gene jener Zellen, die bisher als Neuronenkitt galten.

Wir wussten jetzt: Glia erkennt Nervenimpulse sowohl an Synapsen als auch entlang dem feuernden Axon anhand von ATP, welches die Nervenzelle beiderorts freisetzt. Mittels Kalzium-Ionen werden dann Prozesse im Zellinneren eingeleitet. Infolgedessen sorgen Enzyme dafür, dass eine stimulierte Gliazelle ihrerseits ATP freigibt beziehungsweise bestimmte Gene aktiviert.

Doch um was für Gene handelt es sich dabei? Bewirken sie, dass die Gliazelle rückwirkend umgebende Nervenzellen beeinflusst? Beth Stevens aus meiner Arbeitsgruppe untersuchte, ob ein Zusammenhang mit der so genannten Myelinisierung von Axonen besteht. Neuronenausläufer, die über lange Distanzen Signale verschicken, sind wie erwähnt in eine Myelinschicht von Membranen auslappender Gliazellen regelrecht eingewickelt. Diese Hülle wirkt als elektrischer Isolator und ermöglicht erst die rasche Fortleitung von Impulsen.

In den einzelnen Teilen des Nervensystems bilden sich Myelinhüllen in verschiedenen Phasen der individuellen Entwicklung. Ihrer Ausbildung ist es beispielsweise zu verdanken, dass ein Baby irgendwann den Kopf zu heben vermag. Eine Schädigung des Myelins, wie sie etwa bei Krankheiten wie der multiplen Sklerose auftritt, bedingt schwere neurologische Beeinträchtigungen.



Kontrolle des Neuronenwachstums

Im Allgemeinen benötigen nur Axone mit großem Durchmesser eine solche Isolierschicht. Beth Stevens wollte herausfinden, wie eine unreife Schwannzelle im peripheren Nervensystem eines Fötus oder kleinen Kindes wissen kann, ob ihr Axon eine Myelinisierung erhalten soll. Wie erkennt sie vor allem den richtigen Zeitpunkt, an dem sie den Ausläufer umhüllen muss? Und wie erfahren Gliazellen, ob sie sich für andere Funktionen ausdifferenzieren sollen?

Spielten hierbei vielleicht die elektrischen Impulse des Neurons eine Rolle? Registrierten die unreifen Gliazellen etwa auch in diesem Fall das aus dem Axon austretende ATP? Stevens' Studie ergab, dass sich kultivierte Schwannzellen (also Glia des peripheren Nervensystems) in der Nähe feuernder Axone langsamer teilten als in der Nachbarschaft von Axonen, die keine Impulse erzeugen. Auch hielt ihre Entwicklung dann an und sie bildeten kein Myelin aus. Genauso reagierten die unreifen Gliazellen auf die Zugabe von ATP. Gliazellen des peripheren Nervensystems dürften demnach von Neuronen abgegebenes ATP als Signal für einen Wachstumstopp auffassen.

Ein völlig anderes Ergebnis brachten Experimente an Gehirnglia, die wir zusammen mit dem Team von Vittorio Gallo, unserem Institutsnachbarn, erhielten. Im Gehirn umhüllen Oligodendrozyten Axone. Hier hemmt ATP das Gliawachstum aber keineswegs, im Gegenteil: Von Neuronen ebenfalls abgegebenes Adenosin, sozusagen der Kern des ATP-Moleküls ohne die Phosphatgruppen, regt die Gliazellen sogar zur Reifung und Myelinbildung an. Das bedeutet, dass feuernde Axone ihre eigene Umhüllung stimulieren. Offenbar tragen die Gliazellen im Gehirn und in der Peripherie für diese Signale verschiedene Rezeptoren. So sind von Seiten der Nervenzellen weder spezifische Botenmoleküle noch eine spezielle Adressierung erforderlich, um die Gliaentwicklung zu steuern.

Was letztlich die Myelinisierung auslöst, wissen wir noch nicht genau. Erkenntnisse wie diese sind dringend erforderlich für bessere Therapien gegen myelinzerstörende Krankheiten, die oft tödlich enden und durch die noch mehr Menschen erblinden oder gelähmt werden. Mit Adenosin kennen wir nun erstmals eine Substanz, die den Vorgang im Gehirn von feuernden Axonen her anregt. Möglicherweise könnte man die Patienten mit adenosinähnlichen Substanzen behandeln. Oder kultivierte Stammzellen würden durch Adenosin in myelinisierende Gliazellen verwandelt, die sich in geschädigte Nerven transplantieren lassen.

Lernen und Gedächtnis

Die Anhaltspunkte dafür, dass ATP und Adenosin jene Kalziumwellen vermitteln, die über die Verbände aus Schwannzellen und Oligodendrozyten schwappen, sind deutlich und durch etliche Studien bestärkt. Feststehen dürfte inzwischen auch, dass bei Astrozyten nur ATP die Kalziumreaktion auslöst.

Kommen wir nun zu dem spannenden Aspekt, ob die Glia auch Synapsenfunktionen beeinflusst, etwa deren Übertragungsstärke mit reguliert – was Hirnforscher mit Formen des Lernens in Zusammenhang bringen. Mehrere Studien scheinen auf solche Möglichkeiten hinzuweisen.

Richard Robitaille von der Universität Montreal spritzte in getrennten Versuchen verschiedene Substanzen in Schwannzellen von Fröschen am Synapsenkontakt vom Nerven zum Muskel. Je nach Wirkstoff erhöhte oder erniedrigte sich nun die erzeugte Muskelspannung. Eric A. Newman von der Universität von Minnesota in Minneapolis experimentierte mit der Netzhaut von Ratten. Die ▷

▷ Kalziumwellen, welche bei einer Berührung über die Gliazellen liefen, veränderten die Impulsrate der Sehneuronen. Maiken Nedergaard vom New York Medical College in Valhalla untersuchte in Hirnschnitten von Ratten den Hippocampus, der an der Gedächtnisbildung beteiligt ist. Sie beobachtete, dass Synapsen stärker funkten, wenn benachbarte Astrozyten Kalziumwellen auslösten.

Genau solche Veränderungen in der Übertragungsleistung von Synapsen gelten als ein grundlegender Mechanismus von neuronaler Plastizität beim Lernen. Demnach redet die Glia durchaus mit, wenn sich das Gehirn auf Erfahrungen einstellt.

Erklärungsbedürftig ist allerdings, wie Gliazellen eng lokalisiert auf Neuronenkontakte wirken. Denn die Kalziumwellen scheinen diffus über ganze Populationen hinwegzulaufen. Dergleichen könnte sich gut eignen, um die Gesamtaktivität des Gehirns zu koordinieren, es also etwa auf Schlafen oder Wachen einzustimmen. Insofern hat die Glia nach neueren Erkenntnissen auch auf epileptische Anfälle Einfluss. Eine hochkomplexe Botschaft jedoch lässt sich auf die Weise wohl nicht vermitteln. Feinere Formen der Informationsverarbeitung würden vielmehr eng begrenzte Mitteilungen der Glia erfordern.

Geflüster im Glia-Netzwerk

Dass ein lokales Geflüster zwischen Glia- und Nervenzellen existiert, mutmaßten schon Smith und seine Kollegen in ihrer Arbeit von 1990. Ihnen fehlten damals noch die Methoden, um die natürliche Situation an einer Synapse zu imitieren – also einzelne Astrozyten mit winzigen Mengen von Neurotransmittern zu konfrontieren. Das gelang jetzt Philip G. Haydon von der Universität von Pennsylvania in Philadelphia mit einem Hightech-Laserverfahren. Er brachte in einen Hippocampus-Schnitt gerade so viel Glutamat ein, dass lediglich ein einziger Astrozyt den Botenstoff registrieren konnte. Dann beobachtete der Forscher, wie Kalziumreaktionen nur bei einer kleinen Anzahl von Zellen in der Nähe auftraten.

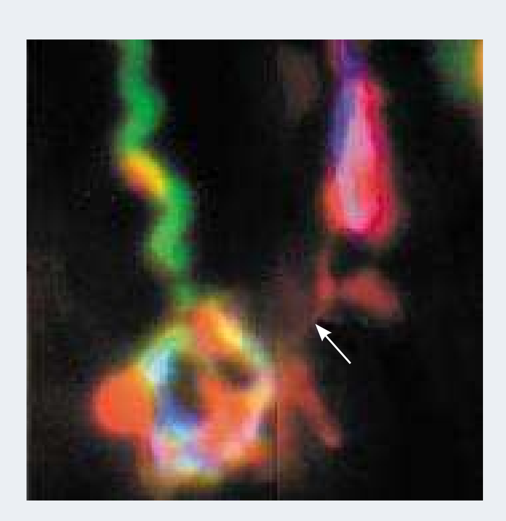
Demnach existieren neben den diffusen, weit übergreifenden Erregungswellen offenbar auch abgegrenzte, enge Erregungsmuster von Astrozytenverbänden. Solche Erregungen stimmen sich mit der Aktivität neuronaler Schaltkreise ab. Wie diese feinen Glia-Schaltmuster sich gestalten und abgrenzen, ist noch unklar. Jedoch ergaben andere Studien, dass Astrozyten neuronale Signale an Synapsen wesentlich verstärken können, indem sie dort den gleichen Botenstoff freisetzen wie das Axonende.

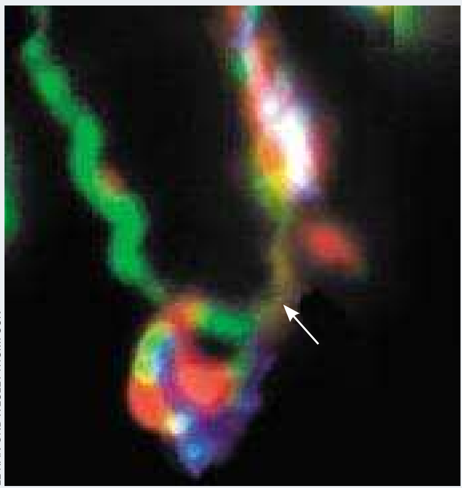
Die Gliaforscher entwarfen zu diesem Komplex folgende Arbeitshypothese: Astrozyten, jene häufigsten Gliazellen des Gehirns, fungieren als Brückenglieder zwischen Neuronenpopulationen wie auch zu fernen Synapsen. Sie können einander über ihre Netze anregen, Neuronen zur Impulserzeugung zu stimulieren, deren Axone mitunter weit entfernt andere Nervenzellen kontaktieren. Sie bestimmen so auch über Distanzen mit, ob Synapsen ihre Kraft verändern sollen. Wenn dieses Modell zutrifft, würde das bedeuten, dass die Glia auf Lern- und Gedächtnisvorgänge Einfluss nimmt. Es hieße auch, dass Gliazellen Neuronenpopulationen koordinieren.

Auf der letzten Jahresversammlung der US-Gesellschaft für Neurowissenschaften im November 2003 wurden Forschungsergebnisse vorgestellt, die dieses Bild bekräftigen. Mehr noch: Manche der jüngsten Erkenntnisse könnten bedeuten, dass Glia sogar bei der Bildung neuer Synapsen mitwirkt (siehe Kasten links). Bereits zwei Jahre zuvor hatten Ben A. Barres, Frank W. Pfrieger und ihre Kollegen von der Universität Stanford (Kalifornien) beobachtet, dass an kultivierten Rattenneuronen in Gegenwart von Astrozyten viel mehr Synapsen wachsen als ohne sie.

Nun gelang es Karen S. Christopherson und Erik M. Ullian in Barres' Labor, aus Astrozytenkulturen den ersten aufgespürten dafür verantwortlichen Boten- ▷

Brücken zur Reparatur





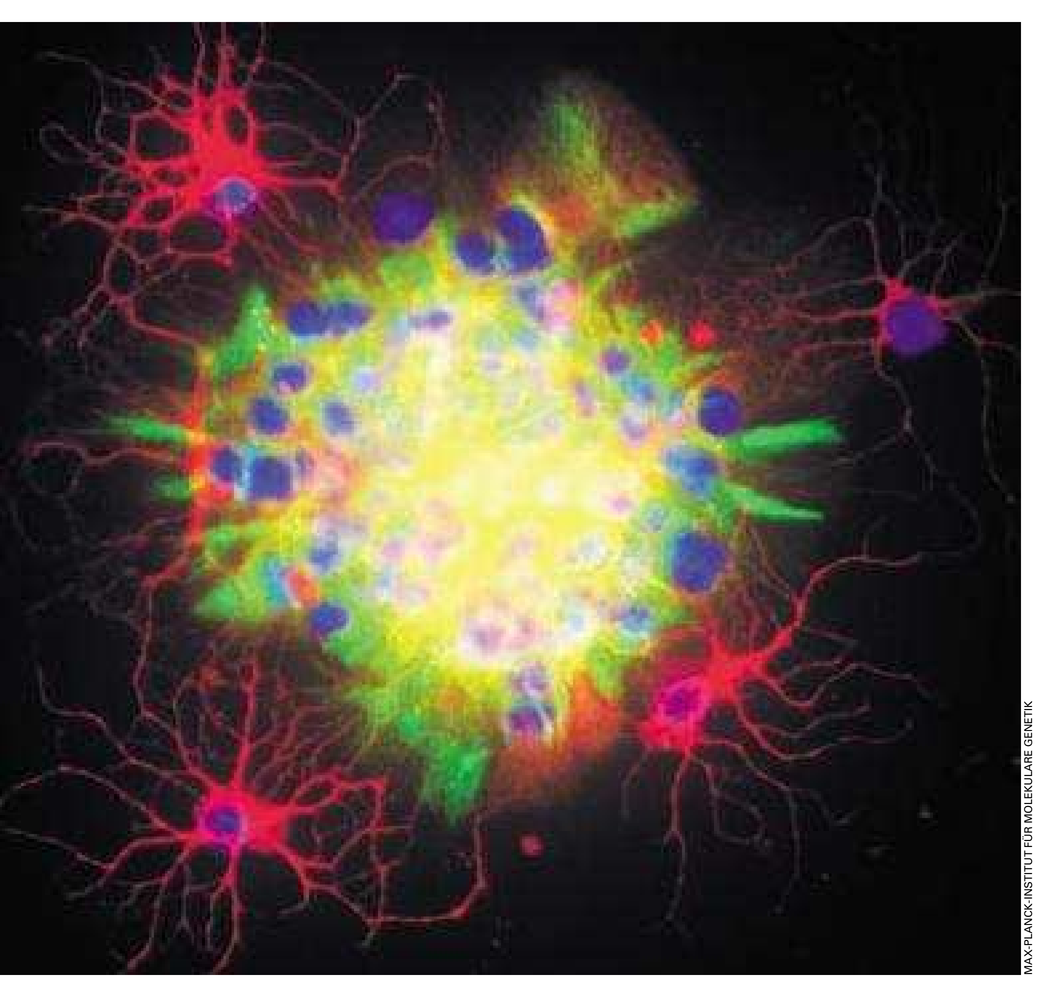
LETIAN UND WESLEY THOMPSON

Zerstörte Axone des peripheren Nervensystems können nachwachsen. Gliazellen weisen ihnen den Weg. Das Axon tastet sich an den alten Schwannzellen entlang hin zu den noch vorhandenen Rezeptorstrukturen der früheren Synapsen. Kürzlich beobachtete eine Forschergruppe von der Universität von Texas in Austin und von der Washington University in Saint Louis (Missouri) den Vorgang an Synapsen auf Muskelzellen von Mäusen, deren Gliazellen eine fluoreszierende Substanz herstellten.

Falls das Axon den Weg jedoch nicht wieder findet, zeigen die Gliazellen eine andere Lösung auf. Die Forscher wurden Zeuge, wie Schwannzellen benachbarter Synapsen einsprangen. Sie bildeten Ausläufer zur beschädigten Kontaktstelle. Daran entlang wuchs dann dem unversehrten Axon ein neuer Ausläufer hin zu der versehrten Synapse (Bilder).

◀ **Nach zwei Tagen bilden Gliazellen (dunkelrot, Pfeil; Bild oben) zur versehrten Synapse eine Brücke. Nach weiteren zwei Tagen war daran entlang ein neuer Axonzweig entstanden (grün, Pfeil; Bild unten).**





MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MOLEKULARE GENETIK

◁ In der gleichen Kultur neuronaler Stammzellen differenzieren sich Gliazellen (grün) und Nervenzellen (rot). Zellkerne erscheinen hier blau gefärbt.

▷ stoff zu identifizieren: Thrombospondin, ein großes Glycoprotein. Offensichtlich geben Astrozyten das Protein ab. Je mehr davon die Forscher einer Neuronenkultur zufügten, umso mehr Synapsen bildeten die Neuronen aus. Bisher waren von Thrombospondin eine Anzahl anderer Funktionen bekannt. So dient es als Bestandteil der extrazellulären Matrix der Zelladhäsion und hat Aufgaben bei der Ausdifferenzierung von Geweben.

Die entscheidende Bedeutung von Thrombospondin für Synapsen verblüffte die Forscher zunächst, erscheint aber plausibel. Denn es handelt sich um ein Ankerprotein, das Moleküle beisammenhalten kann. Es könnte so auch die molekularen Bestandteile von Synapsen zusammenbringen. Wenn das Protein, so wie es nun aussieht, bei der Entwicklung eines jungen Nervennetzes mitwirkt, warum nicht auch dann, wenn reife Nervenzellen ihre Synapsen etwa beim Lernen umorganisieren?

Viele wichtige Fragen sind in diesem Forschungsfeld noch ungelöst. Zu den besonderen Herausforderungen gehört der Nachweis, dass Astrozyten an Synapsen wirklich das Gedächtnis mitformen. Ebenso spannend wird sein zu klären, was im Einzelnen vor sich geht, wenn Astrozytenketten an langen Axonen die Synapsen an deren entferntem Ende kontrollieren. Zukünftige Forschung wird sich auch damit befassen, wie Glia zwischen Neuronenpopulationen vermittelt und deren Aktivität mitbestimmt.

Assoziation von Gefühlen

Dass Astrozyten auf Distanz Neuronenkontakte beeinflussen – also die Entstehung und Veränderung von Synapsen –, sollte vielleicht gar nicht so sehr überraschen. Wenn das Gehirn völlig unterschiedlich verarbeitete Eindrücke und Erinnerungen assoziiert, muss es irgendwie einen schnellen Austausch zwischen getrennten neuronalen Schaltkreisen herstellen. Wenn wir ein Parfüm riechen, kann es sein, dass uns sofort die Gefühle an einen Menschen überkommen, der diesen Duft gern trug – obwohl das Gehirn beides in verschiedenen Regionen verarbeitet.

Würde man Nervenzellen mit angeschlossenen Telefonen vergleichen, dann wären die Gliazellen Handys. Erstere verschicken Nachricht über Kabel und deren Kontaktpunkte, Letztere senden sie einfach in den Raum. Um die Nachricht aber zu empfangen, braucht es dennoch das dafür eingerichtete Gerät. Im Falle der Gehirnzellen sind das die passenden Rezeptoren für Moleküle. So ähnlich könnten Signale in Astrozytenschaltkreisen weite Strecken überwinden. Glia an einer Stelle würde Glia an einem völlig anderen Ort aktivieren. Dadurch würde die Aktivität von Neuronenverbänden in ganz unterschiedlichen Gehirnregionen koordiniert.

Je höher in der Evolution Tiere stehen, desto mehr Glia im Verhältnis zu Neuronen enthält ihr Gehirn. Bei den Säugetieren ist der Anstieg hin zum Menschen eklatant. Philip Haydon vermutet, dass die zunehmende Lernbegabung auf weiträumigen Kontakten von Astrozyten beruhen könnte. Diese These möchten einige Forscher nun prüfen.

Vielleicht verfügt ein geniales Gehirn tatsächlich über mehr – oder bessere – Glia als das eines Durchschnittsmenschen. Einstein lehrt uns, wie wertvoll unkonventionelles Denken sein kann. Richten wir den Blick über die Nervenzellen hinaus auf ihre unterschätzten Gefährten. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



R. Douglas Fields arbeitet am Nationalen Institut der USA für kindliche Gesundheit und menschliche Entwicklung in Bethesda (Maryland). Dort leitet er die Fachgruppe für Entwicklung und Plastizität des Nervensystems. Er hat eine Professur im Programm für Neuro- und Kognitionswissenschaften der Universität von Maryland in College Park.

Astrocytic connectivity in the hippocampus. Von Jai-Yoon Sul et al., in: Neuron Glia Biology, Bd. 1, S. 3, 2004

New insights into neuron-glia communication. Von R. D. Fields und B. Stevens-Graham, in: Science, Bd. 298, S. 556, 18. Okt. 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Grzimeks kranke Affen

Dem Frankfurter Zoo, der den höchsten Menschenaffen-Bestand in Europa pflegt, hat … Direktor Dr. B. Grzimek vor wenigen Wochen zusammen mit dem Okapi im Flugzeug vom Kongo fünf Schimpansen mitgebracht … Zwei von ihnen hatten merkwürdige Beulen … Bei näherer Untersuchung zeigte sich, daß in diesen Hautbeulen Larven von der Größe eines Fingergliedes saßen. Das Institut für Schiffs- und Tropen-Hygiene in Hamburg stellte fest, daß es sich um Fliegenlarven handelt, die bisher bei Menschenaffen noch nicht festgestellt waren. Die Schimpansen ließen sich diese … ohne jede Abwehr mit der Pinzette aus den Beulen herausholen … Da zwei der hier eingetroffenen Tiere außerdem matt waren, untersuchte Prof. Dr. Schloßberger vom Hygienischen Institut der Universität Frankfurt a. M. das Blut der Menschenaffen und stellte bei einigen Malaria-Erreger fest. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 7. Jg., Heft 9, S. 390, September 1954)*

Prototyp einer Schwimmweste

Ein neuartiger, auf der Insel Langeoog erfundener Rettungsgürtel besteht aus mehreren mit Kapok (Pflanzenfaser) gefüllten Teilen, die den Träger in seiner Bewegungsfreiheit nicht behindern. Die Nacken- und Brustteile werden so umgeschnallt, daß sie den Kopf in jeder Lage über Wasser halten. An dem Verschluß des Rettungsgürtels befindet sich noch eine etwa zwei Meter lange Leine mit einem Sicherungshaken. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 17, S. 539, September 1954)*

▼ So eine Schwimmweste aus Kapok bewahrt den Seemann bei Schiffbruch vor dem Untergang.

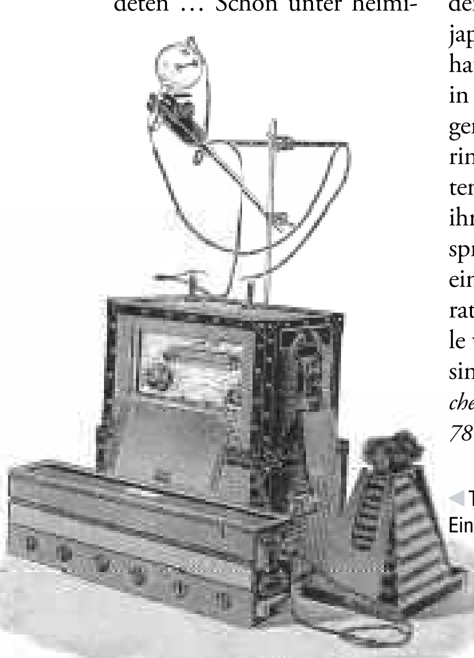


Die Alkohol-»Fahne« wird gemessen

Wenn nicht alles täuscht, wird der Kraftfahrer, der im Verdacht steht, unter der Wirkung alkoholischer Getränke zu fahren, künftig zunächst auf seinen »Atem-Alkohol« geprüft. Man will so entscheiden, ob es notwendig ist, eine Alkohol-Bestimmung des Blutes vorzunehmen … Das Verfahren ist als Vorprüfung brauchbar. Der zu Prüfende muß mit einem Atemzug einen Meßbeutel aufblasen, worauf man das Ergebnis an einem Röhrchen als Verfärbung einer Indikatorschicht ablesen kann. Es spricht bereits bei einem Alkoholgehalt der Atemluft an, der 0,3 Promille Blutalkoholgehalt entspricht … Aus der Stärke der Verfärbung kann man auf die Höhe des Blutalkoholgehaltes schließen. *(Orion, 9. Jg., Nr.17/18, S. IX/13, September 1954)*

Röntgenapparat für Kriegszwecke

Lange schon ist der Wunsch brennend geworden, die ausgezeichnete diagnostische Unterstützung, wie die Röntgenstrahlen sie liefern, auch im Felde verwerten zu können bei der Behandlung des Verwundeten … Schon unter heimischen Verhältnissen stellt eine Röntgeneinrichtung einen sehr diffizilen Apparat dar … Unsere Abbildung veranschaulicht eine der ausdrücklich für Kriegszwecke konstruierten Röntgeneinrichtungen, mit denen die Elektrizitäts-Gesellschaft »Sanitas« zu Berlin … die russischen Lazarette für den gegenwärtigen russisch-japanischen Krieg ausgestattet hat. Der gesamte Apparat ist in drei starken, eisenbeschlagenen Holzkästen mit Tragringen untergebracht; die Kästen sind so fest gebaut und in ihrem Innern … so zweckentsprechend eingerichtet, daß eine Beschädigung des Apparates oder Bruch einzelner Teile vollkommen ausgeschlossen sind. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, 19. Bd., Nr. 49, S. 781, September 1904)*



◀ Tragbarer Röntgenapparat für den Einsatz im Feld

Verdauungssteine

Bei den grossen Plesiosaurusfunden in den Vereinigten Staaten, insbesondere in Süd-Dakota, fiel es auf, dass in den Gerippen jener riesigen Meeresreptilien aus der Juraperiode fast stets einige grössere Steine eingebettet gefunden wurden und zwar in der Gegend des Magens … An ein zufälliges Verschlucken solcher Massen ist nicht zu denken … Brown fand dort häufig auch Schalen von Tintenfischen, Fischwirbel u. dgl. Da der Plesiosaurus keine eigentlichen Mahlzähne besass … und der größte Teil der Nahrung aus Schalentieren bestand …, so darf man schliessen, dass die verschluckten Steine den Zweck hatten, die harten Bestandteile der verschlungenen Mahlzeit zu zerkleinern. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 37, S. 737, September 1904)*



Eine Farm für Menschenzucht

Der russische Grossgrundbesitzer Raschatnikow hat eine grössere Geldsumme der Züchtung schöner Menschen geweiht. Er duldet unter seinen Arbeitern nur die vollkommensten Exemplare von tadelloser Körperschönheit. Unter diesen stiftet er Heiraten … So hat er sich eine Kolonie auserlesener Schönheiten geschaffen … Er hat bereits 40 Musterpaare zusammengebracht und diese haben ihm über 100 ausserordentlich schöne Kinder in die Welt gesetzt. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 37, S. 737, September 1904)*



Als Mikroben das Klima steuerten

In der Frühzeit der Erde war die Sonne zu schwach, um den jungen Planeten warm zu halten. Dass er trotzdem nicht zum Eiskeller wurde, verdanken wir Mikroben, die das Treibhausgas Methan in großen Mengen produzierten.

Von James F. Kasting

Vor etwa 2,3 Milliarden Jahren begannen Photosynthese treibende Bakterien Sauerstoff in die Erdatmosphäre zu pumpen. Damit schufen sie die Voraussetzung für die Entwicklung von höheren, vielzelligen Lebensformen. Zugleich aber beendeten sie die Ära einer anderen Gruppe von Mikroben, die keinen Sauerstoff vertrugen: der Methanbildner. Diese hatten zuvor die Erde beherrscht und für lebensfreundliche Temperaturen gesorgt. In der Frühzeit unseres Planeten schien die Sonne nämlich viel schwächer als heute. Für sich allein hätte sie nicht die Kraft gehabt, eine globale Vereisung zu verhindern. Die Methanbildner oder Methanogene geben als Produkt ihres Stoffwechsels Methan ab, und dieses Treibhausgas gestaltete das Klima auf der frühen Erde trotz kühlerer Sonne angenehm temperiert.

In der heutigen Lufthülle hält sich Methan nicht lange: Schon nach durchschnittlich zehn Jahren hat es mit Sauerstoff reagiert und sich in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt. In einer sauerstofffreien Atmosphäre aber konnte es nach Ergebnissen von Computersimulationen rund 10 000 Jahre existieren.

Aus den Anfängen der Erdgeschichte gibt es keine fossilen Überreste, doch haben Mikrobiologen Grund zu der Annahme, dass Methanogene zu den ersten Lebensformen gehörten. In ihrer Blütezeit könnten sie genug von dem Treibhausgas produziert haben, um die Erde warm zu halten. Und die sinkenden Temperaturen nach ihrem Niedergang verursachten wahrscheinlich die erste globale Vereisung.

Als die Atmosphäre noch größere Mengen Methan enthielt, war die Erde auch kein blauer Planet. Vielmehr erschien sie wohl ähnlich rosa-organgefarben getönt wie Titan, der größte Mond



Von Methan verursacht: Dunstschleier über der Erde vor 3 Milliarden Jahren

von Saturn. Obwohl das Methan dort fast sicher nichtbiologischen Ursprungs ist, könnten die Ähnlichkeiten mit der frühen Erde Aufschlüsse darüber geben, wie Treibhausgase einst das Klima auf dem Globus regelten.

Verzweifelt gesucht: Ausgleich für die schwache Sonne

Als sich vor etwa 4,6 Milliarden Jahren das Planetensystem bildete, erreichte die Sonne nur etwa siebzig Prozent ihrer heutigen Helligkeit (Spektrum der Wissenschaft 4/1988, S. 46). Dennoch liefern die geologischen Zeugnisse bis vor 2,3 Milliarden Jahren keinen stichhaltigen Hinweis auf eine großräumige Vereisung der frühen Erde. Im Gegenteil: Wahrscheinlich war es auf unserem Planeten damals sogar wärmer als im Mittel der letzten 100 000 Jahre.

Auf der Suche nach dem Treibhausgas, das die junge Erde vor dem Zufrieren bewahrte, tippten die Wissenschaftler zunächst keineswegs auf Methan. Als wahrscheinlichsten Kandidaten betrachteten etwa Carl Sagan und George F. Muller von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) in den frühen 1970er Jahren vielmehr Ammoniak; denn es verursacht einen wesentlich stärkeren Treibhauseffekt als Methan. Später stellte sich aber heraus, dass die ultraviolette Strahlung der Sonne, die in einer sauerstofffreien Atmosphäre nicht von einer Ozonschicht abgehalten wird, das stickstoffhaltige Gas schnell zerstört. Ammoniak schied damit aus.

Der nächste offensichtliche Kandidat war Kohlendioxid, das die vielen Vulkane auf der jungen Erde reichlich ausspieen. Zwar gab es Diskussionen um Detailfragen, aber mehr als zwei Jahrzehnte lang bezweifelte kaum jemand die maßgebliche Rolle dieses Gases, obwohl es nur einen relativ schwachen Treibhauseffekt ausübt. Erst 1995 konnten Wissenschaftler von der Harvard-Universität in Cam- ▷

▷ bridge (Massachusetts) mit neuen Befunden den verbreiteten Irrtum aufdecken.

Die Harvard-Gruppe unter Leitung von Rob Rye stellte bei ihren Untersuchungen fest, dass Kohlendioxid in Abwesenheit von Sauerstoff mit Eisenoxid das Mineral Siderit (Eisencarbonat) bildet. Diese Reaktion würde ab dem Achtfachen der heutigen Konzentration von 0,38 Promille einsetzen. Bei der Analyse von 2,2 bis 2,8 Milliarden Jahre alten Erdschichten fand sich jedoch keine Spur von Siderit. Der Kohlendioxidgehalt der Luft muss demnach niedriger gewesen sein und hätte bei weitem nicht ausgereicht, das Einfrieren der Planetenoberfläche zu verhindern.

Damit war die Kandidatensuche wieder eröffnet. Schon in den späten 1980er Jahren hatte sich gezeigt, dass Methan mehr Wärme als Kohlendioxid an der Erdoberfläche festhalten kann, weil es die von dort ausgesandte Strahlung in einem größeren Wellenlängenbereich absorbiert. Gleichwohl wurde sein Einfluss anfangs unterschätzt. Meine Gruppe an der Pennsylvania State University in University Park erkannte jedoch, dass das Gas in der frühen Atmosphäre viel länger überdauert haben muss als heute.

Sumpfgas heizte Erde auf

In der jetzigen Lufthülle reagiert Methan mit sauerstoffhaltigen Spezies wie Hydroxyl-Radikalen, wobei Wasser, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid entstehen. Daher bleibt es im Durchschnitt nur zehn Jahre in der Luft und kann sich nicht genügend ansammeln, um bei der Erwärmung des Planeten eine wesentliche Rolle zu spielen. In der Tat enthält unsere Atmosphäre lediglich 1,7 millionstel Volumenanteile Methan; die Konzentration von Kohlendioxid an der Erdoberfläche beträgt das 220-, die von Wasserdampf gar das 6000fache.

In wie viel höherer Menge als heute muss Methan vorgelegen haben, um die frühe Erde zu erwärmen? Auf der Suche nach der Antwort simulierten wir zusammen mit Kollegen am Ames-Forschungszentrum der Nasa das einstige Klima. Vor 2,8 Milliarden Jahren hatte die Sonne erst achtzig Prozent ihrer heutigen Helligkeit. Unter diesen Umständen müsste die Atmosphäre zwei Prozent Kohlendioxid enthalten haben, um die Oberfläche am dauerhaften Gefrieren zu hindern. Das ist gut fünfzigmal so viel wie heute und achtmal so viel wie der Wert, ab dem sich Siderit gebildet hätte. Setzt man in den Simulationen die höchstmögliche Kohlendioxidkonzentration ein, so benötigt man noch 0,1 Prozent Methan in der Atmosphäre, um die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche über dem Gefrierpunkt zu halten.

Damit sich ein solcher Pegel auf der Urerde einstellte, genügte es, dass das Gas in derselben Menge produziert wurde wie heute. Waren die Methanbildner damals dazu fähig? Um das herauszufinden, schlossen wir uns mit der Mikrobiologin Janet L. Siefert von der Rice-Universität in Houston (Texas) zusammen.

Diese ist mit vielen ihrer Kollegen der Ansicht, dass Methanogene zu den ersten Mikroorganismen auf der Erde gehörten. Sie dürften jene Nischen besetzt haben, die mittlerweile von Sauerstoffproduzenten und Sulfatreduzierern eingenommen werden. Demnach kam ihnen damals eine viel wichtigere biologische und klimatische Rolle zu als heute.

In einer von Vulkanismus geprägten Welt sollten sich Methanogene ausgesprochen wohl gefühlt haben. Viele von ihnen ernähren sich direkt von Wasserstoffgas und Kohlendioxid und stoßen Methan als Abfallprodukt aus. Andere verwerten Acetat und weitere Verbindungen, die bei der Zersetzung von organischem Material entstehen, wenn kein Sauerstoff vorhanden ist. Aus diesem Grund können heutige Methanogene nur in sauerstofffreier Umgebung leben – etwa im Magen von Kühen oder im Schlamm unter überfluteten Reisfeldern.

Die zahlreichen Vulkane auf der frühen Erde setzten große Mengen Wasserstoff frei. Dieser sammelte sich in Atmosphäre und Ozeanen an, weil es noch keinen freien Sauerstoff gab, der mit ihm reagieren konnte. Dabei erreichte er vermutlich hinreichend hohe Konzentrationen, um für Mikroorganismen verwertbar zu sein.

Mit Vollgas in die Saunawelt

Aus diesem Grund halten es einige Wissenschaftler auch für möglich, dass Methanbildner, die sich von Wasserstoff geologischen Ursprungs ernähren, die Basis mikrobieller Ökosysteme im Boden des Mars oder des eisbedeckten Jupitermonds Europa bilden. In der Tat lassen jüngste Messdaten vom Raumschiff Mars Express der Europäischen Weltraumbehörde (Esa) darauf schließen, dass die Marsatmosphäre etwa zehn Teile pro Milliarde *(parts per billion)* Methan enthält. Dieses Gas könnte von Mikroben stammen, die unter der Planetenoberfläche leben.

Nach Schätzungen von Geochemikern erreichte der Wasserstoff in der frühen Erdatmosphäre – bevor es Methanogene gab, die ihn verzehrten – Konzentrationen von einigen Promille. Wie thermodynamische Rechnungen zeigen, konnten die Mikroben den größten Teil davon in Methan umwandeln, wenn Elemente wie Phosphor und Stickstoff in biologisch verwertbarer Form vorhanden waren. Dies traf mit Sicherheit zu: Die chemische Zersetzung von Gestein lieferte genügend lösliches Phosphat, und im Ozean lebende Mikroorganismen produzierten jede Menge Stickstoffverbindungen. Unter solchen Umständen wären die Bakterien zweifellos fähig gewesen, die etwa ein Promille Methan zu produzieren, die den Computermodellen zufolge zum Warmhalten der Erde nötig waren.

In dieses Bild passt auch, dass es die heutigen Methanbildner ziemlich heiß mögen. Die meisten gedeihen am besten bei mehr als 40 Grad Celsius, und manche fühlen sich sogar erst bei Saunatemperaturen von 85 Grad so richtig wohl. Die Wärme liebenden Arten vermehren

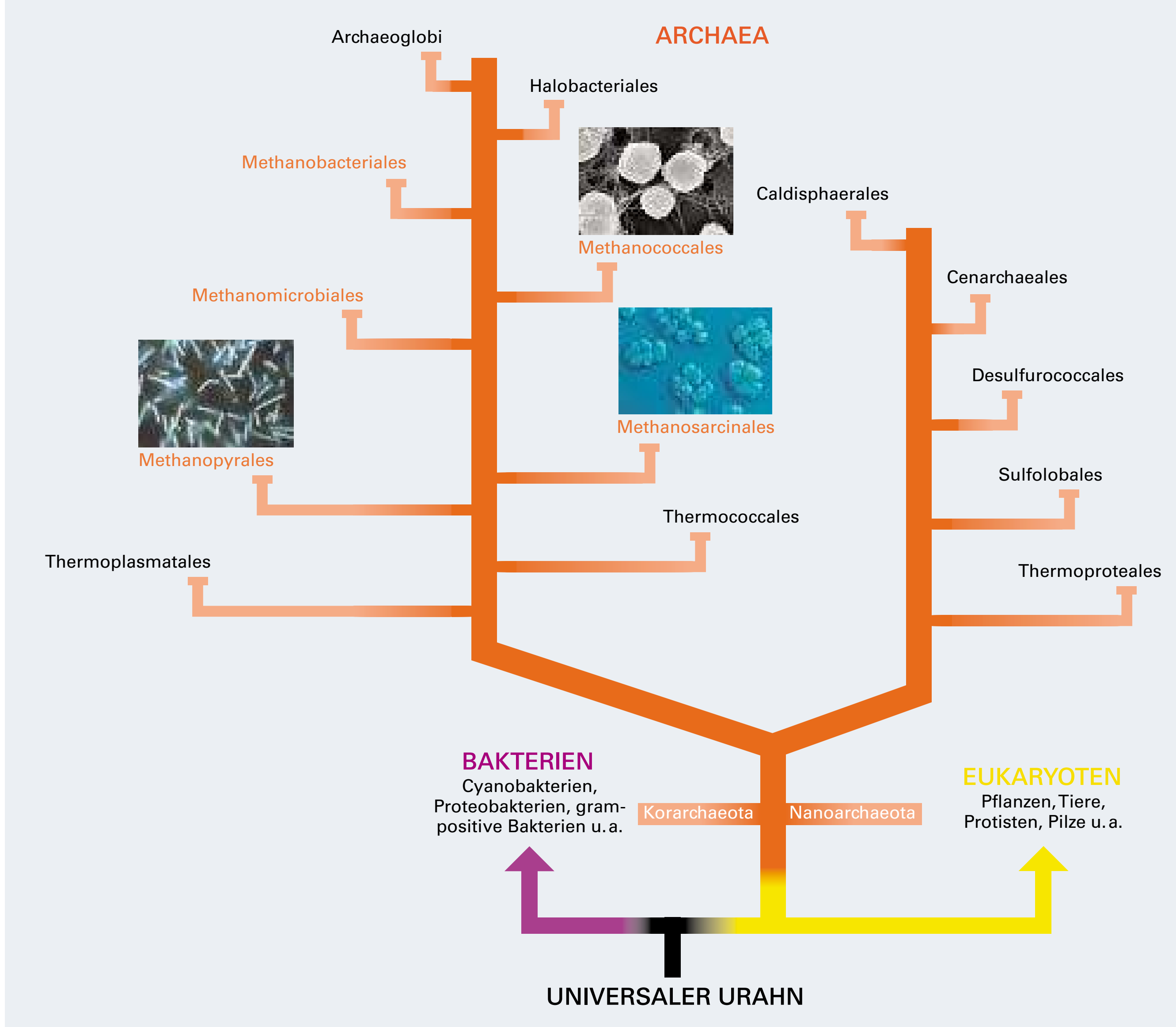
IN KÜRZE

▶ Bis vor etwa 2,3 Milliarden Jahren waren Atmosphäre und Ozeane der Erde **praktisch sauerstofffrei** und damit ein Paradies für sauerstoffempfindliche Mikroben – darunter solche, die als Endprodukt ihres Stoffwechsels **Methan** abgeben.

▶ Dieses Gas hält sich in einer sauerstofffreien Lufthülle sehr lange. Es konnte sich deshalb bis fast zum 600fachen seiner heutigen Konzentration anreichern.

▶ Das zusätzliche Methan verursachte einen **Treibhauseffekt**, der die Erde warm hielt, obwohl die Sonne damals schwächer schien. Als dann photosynthetische Organismen die Atmosphäre mit Sauerstoff anreicherten und die Methanogene sich in sauerstofffreie Nischen zurückziehen mussten, kam es zur **ersten globalen Vereisung.**

Stammbaum der Methanproduzenten



JOHNNY JOHNSON (ILLUSTRATION); BOONYARATANAKORNKIT UND D. S. CLARK, CHEMICAL ENGINEERING, UND G. VRDOLJAK, ELEKTRON MICROSCOPE LAB, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY (OBEN); KARL O. STETTER, UNIVERSITÄT REGENSBURG (LINKS); GENOME NEWS NETWORK (RECHTS)

Methan produzierende Mikroben leben ausschließlich in sauerstofffreier Umgebung. Sie gehören zu den Archaea, einem der drei großen Organismenreiche, die jeweils von einem eigenen, unbekannten Vorfahren abstammen. Es gibt sie in einer Vielzahl von Formen, darunter Stäbchen und Kugeln (Fotos). Viele Archaea gedeihen nur unter Extrembedingungen wie in heißen Quellen, auf Gletschern oder in stark sauren oder versalzenen Böden. Die Methanbildner stellen mit ihren fünf Ordnungen fast die Hälfte der Mitglieder dieses Organismenreichs, das vermutlich die frühesten Lebewesen überhaupt umfasst.

sich auch schneller. Folglich nahm bei sich verstärkendem Treibhauseffekt und steigenden Temperaturen ihr Anteil an der Gesamtpopulation zu. Damit erhöhte sich aber auch der Ausstoß an Methan und dessen Konzentration in der Atmosphäre. Das wiederum ließ die Oberflächentemperatur weiter klettern, bis sie trotz der kühleren Sonne den heutigen Wert übertraf.

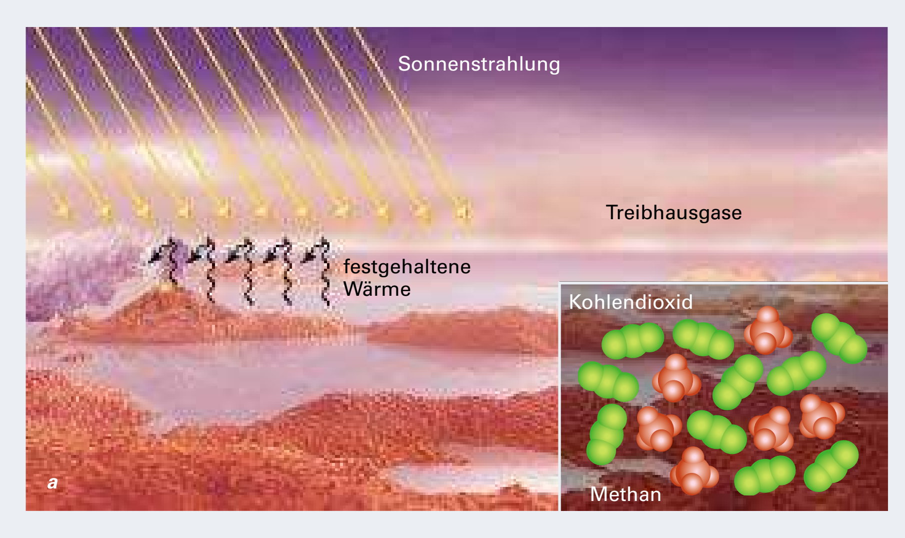
Dank dieser positiven Rückkopplungsschleife hätte die Erde schließlich ein solches Treibhaus werden können, dass alle Lebensformen außer den extreme Hitze liebenden Mikroben zu Grunde gegangen wären. Zum Glück setzte ein natürlicher Prozess dem Aufschaukeln jedoch ein Ende. Sobald die Konzentration von Methan in der Atmosphäre über ein Promille steigt, beginnt es unter dem Einfluss von Sonnenlicht zu längerkettigen Kohlenwasserstoffen zu polymerisieren. Diese lagern sich an Staubpartikel an und bilden so einen organischen Dunst, wie er auf dem größten Mond des Planeten Saturn zu beobachten ist (siehe Kasten auf S. 66). Die Titan-Atmosphäre besteht wie die irdische hauptsächlich aus molekularem Stickstoff, enthält außerdem aber einen gewissen Prozentsatz an Methan sowie höheren Kohlenwasserstoffen.

Dunstschleier als Sonnenschirm

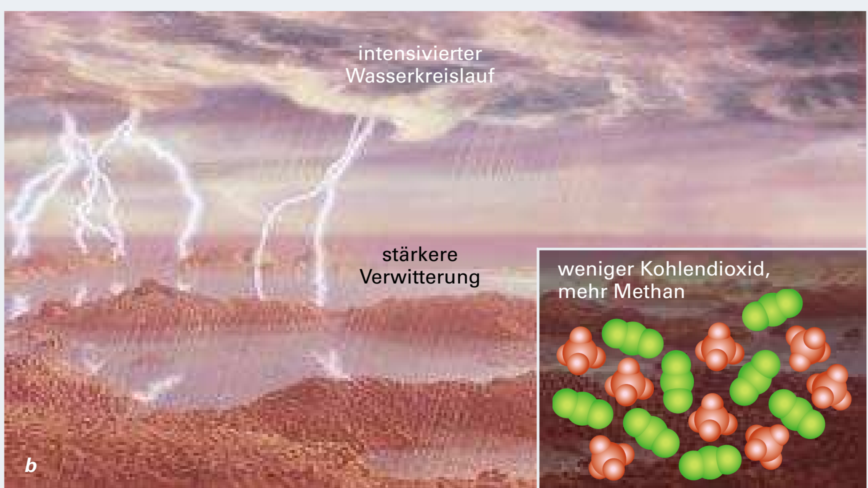
Die Bildung eines organischen Dunstschleiers könnte auch die frühe Erde vor Überhitzung bewahrt haben. Da er in großer Höhe entstand, wirkte er auf das Klima genau umgekehrt wie Methan. ▷

Wie Methan einen Dunstschleier bildet

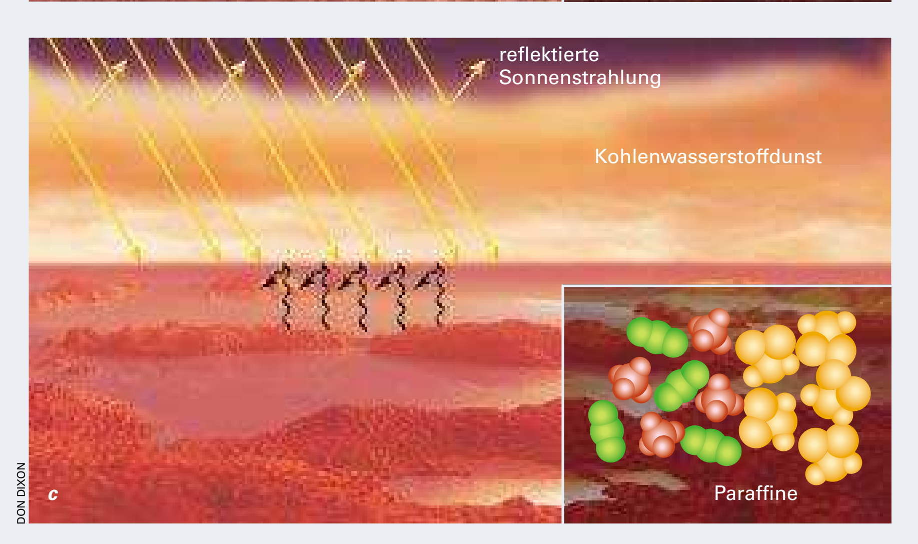
Ein rosa-orangefarbener Dunst von Kohlenwasserstoffteilchen, hervorgegangen aus Methan, hielt die frühe Erde in einem prekären Gleichgewicht zwischen Treibhaushölle und Kältestarre. Zunächst stieg die Methankonzentration an *(a)*. Das verstärkte den Treibhauseffekt *(b)*. Doch nach einigen zehntausend Jahren bildete sich ein Dunstschleier, der für Abkühlung sorgte *(c)*.



Methan übernahm seine Schlüsselrolle im Klimageschehen der frühen Erde wohl schon kurz nach dem Ursprung des Lebens vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren. In einer Welt ohne elementaren Sauerstoff konnten so genannte Methanogene – einzellige Ozeanbewohner – üppig gedeihen. Zudem hielt sich das von ihnen produzierte Methan in der sauerstofffreien Atmosphäre viel länger als heute. Es erwärmte zusammen mit einem anderen, häufigeren Treibhausgas – Kohlendioxid aus Vulkanen – die Erdoberfläche, indem es die von dort abgestrahlte Wärme zurückhielt (schwarze Pfeile), das Sonnenlicht (gelbe Pfeile) aber hindurchließ.



Viele Methanogene mögen es heiß und produzierten so mit zunehmender Wärme immer mehr Methan. Diese positive Rückkopplungsschleife intensivierte den Treibhauseffekt und ließ die Temperaturen an der Erdoberfläche weiter steigen. Das warmfeuchte Klima begünstigte die Verwitterung des Gesteins auf den Kontinenten. Dies entzog der Atmosphäre Kohlendioxid, sodass dessen Konzentration sank, während die von Methan immer noch anstieg. Schließlich lagen beide Gase in fast gleicher Menge vor. Unter diesen Bedingungen änderte sich das chemische Verhalten von Methan gegenüber Sonnenlicht dramatisch.

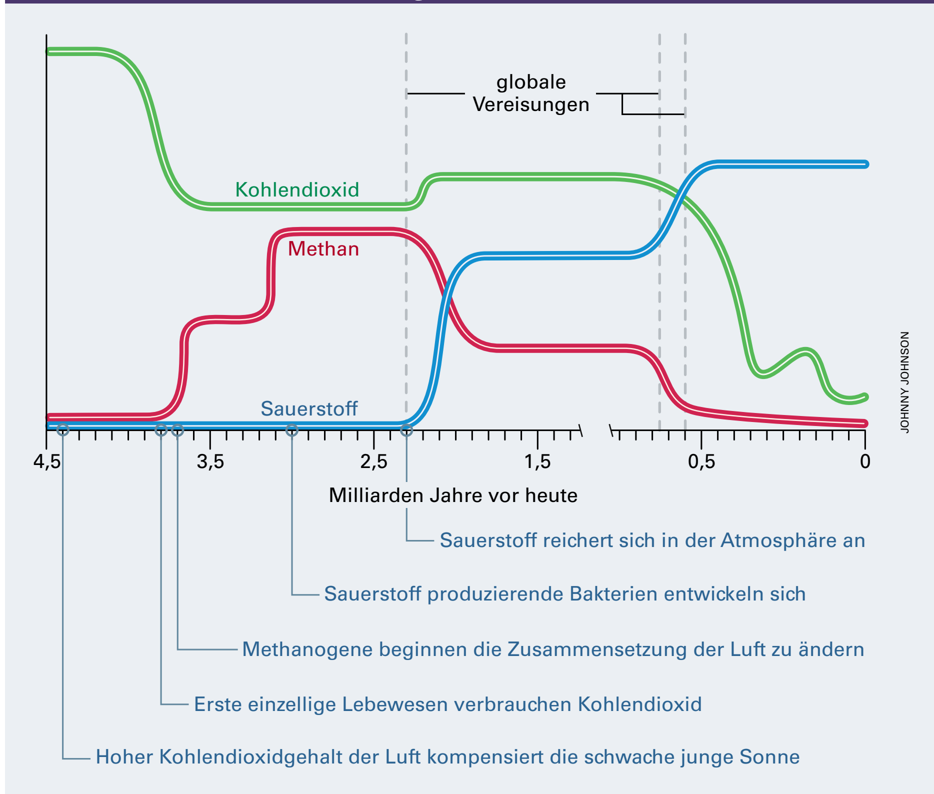


Bevor die steigende Methankonzentration die Erde in eine Sauna verwandeln konnte, begannen einige Gasmoleküle, angeregt von der UV-Strahlung der Sonne, sich zu langen Kohlenwasserstoffketten (Paraffinen) zu verbinden, die in großer Höhe auf Staubteilchen kondensierten. Diese Partikel geboten dem Treibhauseffekt Einhalt, indem sie kurzwelliges Sonnenlicht abfingen und in den Weltraum zurückwarfen. Dadurch gelangte weniger Strahlung auf die Erdoberfläche. In dem resultierenden kühleren Klima gediehen die Wärme liebenden Methanogene schlechter, was die Produktion an Methan verringerte – ein negatives Feed-back kam in Gang.

▷ Dieses lässt – wie die anderen Treibhausgase – den größten Teil des Sonnenlichtes passieren, hält aber die von der Erde kommende Wärmestrahlung in den unteren Luftschichten fest. Im Gegensatz dazu fängt organischer Dunst in großer Höhe einfallendes Sonnenlicht ab und strahlt es in den Weltraum zurück, sodass weniger davon auf die Erdoberfläche gelangt. Auf Titan sorgt dieser Effekt für sieben Grad tiefere Temperaturen.

Eine ähnliche Dunstschicht könnte auch die frühe Erde abgekühlt haben. Dadurch verschob sich die Methanogenpopulation wieder in Richtung der langsamer wachsenden Spezies mit Vorliebe für ein gemäßigtes Klima, was die Methanproduktion drosselte. Diese negative Rückkopplungsschleife wirkte so lange, bis sich der Kohlenwasserstoffnebel lichtete und erneut der positive Feed-back-Zyklus in Gang kam. Auf diese Weise könnten sich Erdtemperatur und atmosphärische Zusammensetzung genau an dem Punkt stabilisiert haben, an dem eine dünne Smogschicht den Planeten einhüllte.

Meilensteine der Erdgeschichte



Änderungen in der Konzentration der wichtigsten Atmosphärengase könnten erklären, warum in der fernen Vergangenheit drei extreme Eiszeiten die Erde heimsuchten. Zunächst florierten Methan produzierende Mikroorganismen (Methanogene). Als aber vor 2,3 Milliarden Jahren dann Sauerstoff in die Luft gelangte, verloren sie einen Großteil ihres bisherigen Lebensraums. Zunächst konnten sie noch in tieferen Meeresschichten überleben und einen gewissen Methanspiegel in der Atmosphäre aufrechterhalten. Doch ein weiterer Sauerstoffschub machte auch dem ein Ende und führte in Verbindung mit einem Abfall beim Kohlendioxid zu erneuten Vereisungen.

Plötzlicher Klimakollaps

Irgendwann aber versagte dieser globale Thermostat. In der als Proterozoikum bekannten Periode der Erdgeschichte gab es mindestens drei globale Eiszeiten: die erste vor 2,3 Milliarden und zwei weitere vor 750 Millionen und 600 Millionen Jahren. Die Ursache dieser Temperaturstürze war lange rätselhaft – die Methanhypothese liefert jedoch eine plausible Erklärung.

Die erste der drei extremen Kältephasen wird oft als huronische Vereisung bezeichnet, weil man sie im Gestein unmittelbar nördlich des Huron-Sees in Südkanada gut erkennen kann. Ähnlich wie bei den besser untersuchten Vereisungen im späten Proterozoikum war die Erde damals einschließlich der Ozeane offenbar komplett zugefroren und kreiste quasi als riesiger Schneeball um die Sonne (Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 58). Dafür spricht, dass selbst Kontinente in Äquatornähe einen Eispanzer trugen, dessen Spuren noch heute erkennbar sind.

Dazu gehören durcheinander geworfene Gesteinstrümmer – so genanntes Geschiebe – und anderes Material, das Gletscher vom Untergrund abschabten, verfrachteten und beim Schmelzen vor 2,45 bis 2,2 Milliarden Jahren unsortiert abluden. An dem glazialen Schutt lässt sich zugleich ein tief greifender Wandel in der Atmosphäre ablesen. Das ältere Gestein darunter enthält Geröll aus Uraninit und Pyrit – zwei Mineralen, die nur in Abwesenheit von Sauerstoff stabil sind. Über den Eiszeitschichten liegt dagegen Sandstein mit rotem Hämatit; dieses Eisenoxidmineral aber bildet sich ausschließlich in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre. Demnach fand die huronische Vereisung genau zu dem Zeitpunkt statt, als sich Sauerstoff in der Atmosphäre anzureichern begann.

Für diese auffällige Koinzidenz gab es bis vor kurzem keine Erklärung. Wenn jedoch Methan für ein warmes frühes Erdklima sorgte, wäre die globale Eiszeit vor 2,3 Milliarden Jahren eine natürliche Konsequenz aus dem Anstieg der Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre. Viele der methanogenen und anderen anaeroben Mikroorganismen, die zuvor die Erde beherrscht hatten, vertrugen die sauerstoffhaltige Luft nicht und kamen entweder um oder mussten sich in immer weiter eingeschränkte Lebensräume zurückziehen.

War damit das Ende der Methangeschichte gekommen? Nicht unbedingt. Zwar hat Methan seither nie wieder das Klima dominiert, aber es könnte noch für einige Zeit eine begrenzte Rolle gespielt haben. Vielleicht lag seine Konzentration in der Luft auch im späten Proterozoikum, das vor 600 Millionen Jahren zu Ende ging, lange Zeiträume hindurch deutlich über den heutigen Werten. Das wäre möglich, wenn die Atmosphäre noch nicht so viel Sauerstoff enthielt und die tiefen Ozeane sauerstofffrei und arm an Sulfat waren – einem Salz, das in heu- ▷

Im Dunst vereint, aber grundverschieden

Der größte Saturnmond Titan verdankt sein orangefarbenes Aussehen einer Schicht aus Kohlenwasserstoffteilchen, die hoch oben in der Atmosphäre bei der Zerstörung von Methan durch Sonnenlicht entstehen. Ein ähnlicher Dunstschleier könnte die Erde vor 2,3 Milliarden Jahren eingehüllt haben. Aber zum Glück für die damaligen Lebewesen endet hier die Parallele.



NASA / JPL-CALTECH

Der Dunstschleier um die frühe Erde war wesentlich dünner als der um Titan. Sonst hätte er so viel Sonnenlicht ins Weltall zurückgeworfen, dass die Erdoberfläche völlig vereist wäre – ein Todesurteil für die einzelligen Mikroben, die das Methan produzierten. Tatsächlich ist die Titan-Atmosphäre mit eisigen –179 Grad Celsius sehr viel kälter, als es unsere Lufthülle je war.

Auf dem Saturnmond vermutet man Ozeane aus flüssigem Methan, Stickstoff und Ethan, aus denen das Methan verdampft. Das würde den dichten Schleier erklären. Verglichen damit setzten die frühen Mikroben auf der Erde nur wenig Methan frei, sodass die Dunstschicht relativ dünn blieb.

Andererseits reichte die Gasmenge, um einen merklichen Treibhauseffekt zu verursachen. Methan lässt nämlich Sonnenlicht passieren, absorbiert aber Wärmestrahlung von der Erdoberfläche und hält sie so in der unteren Atmosphäre zurück. Ähnlich wirkt Kohlendioxid, das auf der Urerde gleichfalls in relativ hohen Konzentrationen vorkam und zusammen mit flüssigem Wasser die Entwicklung von Leben erst ermöglichte. Keine dieser beiden Verbindungen ließ sich bisher jedoch auf Titan nachweisen. Daraus und aus der extremen Kälte ergibt sich, dass Leben, wie wir es kennen, dort vermutlich nicht entstehen konnte.

Dennoch beeinflussten chemisch-physikalische Vorgänge, wie sie in der Titanatmosphäre ablaufen, einst auch das Erdklima. Sie näher zu erforschen, ist Aufgabe der Esa-Sonde Huygens, die das Raumschiff Cassini kürzlich zum Saturn gebracht hat. Dringt das Gefährt nächstes Jahr erfolgreich in die Titanatmosphäre ein, wird es erste direkte Erkenntnisse über den methaninduzierten Smog liefern. Daraus erhofft man sich Hinweise darauf, wie die Erde für mehr als eine Jahrmilliarde ihr delikates Gleichgewicht zwischen der Kühlwirkung des Dunstschleiers und dem Treibhauseffekt des Methans aufrechterhielt, sodass der Planet diese lange, kritische Zeitspanne hindurch lebensfreundlich blieb.

▷ tigem Meerwasser verbreitet vorkommt. Dann hätte weiterhin zehnmal so viel Methan aus den Meeren in die Atmosphäre entweichen und der Gehalt des Gases in der Luft 0,1 Promille erreichen können. Damit ließe sich erklären, warum das Proterozoikum fast eineinhalb Milliarden Jahre eisfrei blieb, obwohl die Sonne immer noch relativ schwach strahlte. Meine Kollegen und ich halten es für denkbar, dass ein zweiter Anstieg der Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre oder eine Zunahme der gelösten Sulfatmenge die beiden späteren Schneeball-Episoden in der Erdhistorie ausgelöst haben – wiederum durch Absenken der Konzentration an wärmendem Methan.

Extraterrestrisches Methan

So plausibel die Geschichte von der Weltherrschaft methanogener Organismen klingen mag – es gibt keinen direkten Beweis dafür. Dazu müsste man schon einen Gesteinsbrocken mit eingeschlossenen Blasen der frühen Atmosphäre finden, was höchst unwahrscheinlich ist. Bislang bleiben uns nur eine Reihe indirekter Indizien – vor allem die niedrigen Kohlendioxidwerte, auf die man aus dem Fehlen von Siderit schließen kann, und der Zeitpunkt der ersten globalen Vereisung.

Vielleicht lässt sich unsere Hypothese auf der Erde selbst niemals verifizieren. Aber im All könnte sich der Beweis dafür finden – bei der Beobachtung erdähnlicher Planeten, die andere Sonnen umkreisen. Sowohl die Nasa als auch die Esa arbeiten am Entwurf großer Weltraumteleskope, um bei 120 nahe gelegenen Sternen nach erdähnlichen Planeten zu suchen. Falls diese Missionen – »Terrestrial Planet Finder« und »Darwin« – solche Planeten aufspüren, könnte man in deren Atmosphäre nach Gasen fahnden, die auf die Existenz von Leben hinweisen.

Wäre Sauerstoff in größerer Menge vorhanden, ließe das fast mit Sicherheit auf eine der modernen Erde vergleichbare Biologie schließen – vorausgesetzt, es gäbe zugleich flüssiges Wasser. Auch hohe Methanwerte würden eine Form von Leben zulassen. Soweit wir wissen, können nur Lebewesen dieses Gas in hohen Konzentrationen herstellen. Die Entdeckung von Methan böte somit die faszinierende Möglichkeit, direkte Einblicke in den Zustand unseres Planeten während der Frühzeit seiner Geschichte zu gewinnen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



James F. Kasting ist Professor für Geowissenschaften an der Pennsylvania State University in University Park und hat 1979 an der Universität von Michigan promoviert. Zusammen mit weiteren Wissenschaftlern entwickelt er derzeit das theoretische Fundament für den Terrestrial Planet Finder der Nasa: ein Weltraumteleskop, das Planeten bei anderen Sternen aufspüren und ihre Atmosphäre auf Lebenszeichen untersuchen soll.

Methane-rich proterozoic atmosphere? Von A. A. Pavlov et al., in: Geology, Bd. 31, S. 87; Januar 2003

Life and the evolution of earth's atmosphere. Von J. F. Kasting und J. L. Siefert, in: Science, Bd. 296, S. 1066; 10.5.2002

Greenhouse warming by methane in the atmosphere of early earth. Von A. A. Pavlov et al., in: Journal of Geophysical Research – Planets, Bd. 5, S. 11981; Mai 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



EVEN MORE THAN EVER
WORLD O' FLAVORS
TRY THIS
MEGA·CHOICE MALL
SOCKS!
1,000 colors!
12,000,000 TITLES
OF STYLES!
OF CHOICES!
TRY 'EM ALL
CHOICES 'Я' U



Die Qual der Wahl

Wem sehr viele Alternativen offen stehen, der darf sich besonders glücklich schätzen – sollte man meinen. Tatsächlich aber zeigen Studien, dass ein Überangebot an Wahlmöglichkeiten sogar unglücklich machen kann.

Von Barry Schwartz

Heutzutage können wir unter mehr Angeboten auswählen als je zuvor – und das in den unterschiedlichsten Lebensbereichen. Bis zu einem gewissen Grad verbessert dieser Reichtum an Möglichkeiten unser Leben. Es wäre logisch, daraus zu folgern: je mehr Auswahl, desto besser. Wer gern unbegrenzte Wahlmöglichkeiten hat, wird sie eben nach Belieben nutzen, und wer keinen Wert darauf legt, kann ja die unzähligen Sorten Cornflakes, die er noch nie probiert hat, einfach ignorieren. Doch die aktuelle psychologische Forschung liefert starke Indizien gegen diese Annahme. Zwar ist eine gewisse Wahlfreiheit zweifellos besser als gar keine, aber mehr ist nicht immer besser als weniger.

Dieser Befund stimmt mit allgemeinen sozialen Trends überein. Nach Untersuchungen verschiedener Wissenschaftler – unter ihnen David G. Meyers vom Hope College und Robert E. Lane von der Yale-Universität – geht in den Industrieländern der Zuwachs an Angeboten und Wohlstand tatsächlich mit vermindertem Wohlbefinden einher. Während sich in den USA das Bruttoinlandsprodukt in den letzten dreißig Jahren mehr als verdoppelt hat, sank der Anteil der US-Bürger, die sich als »sehr glücklich« einstufen, um rund fünf Prozent – das sind immerhin 14 Millionen. Außerdem sind mehr Menschen depressionskrank als je zuvor. Natürlich vermag ein einzelner Faktor das verminderte Wohlbefinden nicht zu erklären, aber mehreren Untersuchungen zufolge spielt die explosive Zunahme des Auswahlangebots eine wichtige Rolle.

Somit scheinen die Menschen mit wachsendem gesellschaftlichem Reichtum und zunehmender Wahlfreiheit immer unzufriedener zu werden. Was könnte in einer Ära immer größerer persönlicher Autonomie und Selbstbestimmung dieses Ausmaß an Missbehagen erklären?

◀ **Sonderangebot! Riesenauswahl! Nicht nur in den USA präsentiert sich die Konsumwelt dem Kunden als verwirrender Jahrmarkt.**

Maximierer und Genügsame

Zusammen mit mehreren Kollegen habe ich in letzter Zeit erforscht, warum viele Menschen sich nicht freuen, wenn ihre Möglichkeiten wachsen. Zunächst trafen wir eine Unterscheidung zwischen »Maximierern« *(maximizers)*, die stets auf die bestmögliche Auswahl zielen, und »Genügsamen« *(satisficers)*, die sich mit einer halbwegs zufrieden stellenden Option begnügen, obwohl es noch bessere Möglichkeiten geben mag.

Um die individuelle Neigung zum Maximieren festzustellen, formulierten wir eine Gruppe von Aussagen und definierten eine Maximierungsskala. Wir forderten mehrere tausend Personen auf, sich selbst auf einer Skala von eins bis sieben – von »bin überhaupt nicht einverstanden« bis »stimme völlig zu« – einzustufen, wenn sie mit Aussagen konfrontiert wurden wie »Ich gebe mich nie mit dem Zweitbesten zufrieden«. Außerdem bewerteten wir, wie zufrieden sie nachträglich mit ihrer Entscheidung waren.

Wir definierten keine scharfe Grenze zwischen Maximierern und Genügsamen; im Allgemeinen zählten wir Testteilnehmer mit Durchschnittswerten oberhalb vier – dem Skalenmittelpunkt – zu den Maximierern und diejenigen unterhalb zu den Genügsamen. Die Personen mit den höchsten Testwerten – die größten Maximierer – stellen mehr Produktvergleiche an als die schwächsten Punktesammler, und zwar sowohl vor als auch nach der Kaufentscheidung; auch brauchen sie länger dafür. Wenn Genügsame ein Produkt finden, das ihren Standards entspricht, hören sie mit der Suche auf. Maximierer hingegen verwenden enorme Mühe darauf, Beschriftungen zu lesen, Konsumentenmagazine zu studieren und neue Produkte auszuprobie- ▷

MATT COLLINS

Die Maximierungsskala

Die nachfolgenden Aussagen unterscheiden zwischen »Maximierern« *(maximizers)* und »Genügsamen« *(satisficers)*. Testpersonen stufen sich selbst bezüglich jeder Aussage von eins bis sieben ein – von »bin überhaupt nicht einverstanden« bis »stimme völlig zu«. Generell zählen wir Personen mit einem Durchschnittswert über vier zu den Maximierern. Als wir die Durchschnittswerte von Tausenden von Teilnehmern betrachteten, fanden wir, dass je rund ein Drittel über 4,75 und unter 3,25 lag. Ungefähr zehn Prozent aller Testpersonen waren extreme Maximierer (mit Durchschnittswerten über 5,5) und rund zehn Prozent extrem Genügsame (mit Durchschnittswerten unter 2,5).



MATT COLLINS; ÜBERNOMMEN MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG DES JOURNAL OF PERSONALITY AND SOCIAL PSYCHOLOGY, © 2002 AMERICAN PSYCHOLOGICAL ASSOCIATION

1. Jedes Mal, wenn ich vor eine Entscheidung gestellt werde, versuche ich mir alle anderen Möglichkeiten vorzustellen – sogar solche, die im Moment gar nicht verfügbar sind.
2. Gleichgültig, wie zufrieden ich mit meinem Beruf bin – ich tue jedenfalls gut daran, nach besseren Möglichkeiten Ausschau zu halten.
3. Wenn ich beim Autofahren Radio höre, probiere ich oft andere Sender aus, um herauszufinden, ob dort etwas Besseres läuft – auch wenn ich mit dem, was ich gerade höre, relativ zufrieden bin.
4. Beim Fernsehen wechsle ich oft die Kanäle und »zappe« durch die gerade laufenden Programme – auch wenn ich eigentlich versuche, eine bestimmte Sendung zu sehen.
5. Beziehungen sind für mich wie Kleidungsstücke: Ich erwarte, dass ich viele ausprobieren muss, bevor ich das perfekt Passende finde.
6. Es fällt mir oft schwer, ein Geschenk für einen Freund zu kaufen.
7. Videos ausleihen ist wirklich schwer. Ich gebe mir immer große Mühe, das beste herauszusuchen.
8. Beim Einkaufen fällt es mir schwer, Kleidungsstücke zu finden, die ich wirklich mag.
9. Ich bin ein großer Freund von Listen, die eine Rangfolge aufstellen – die besten Filme, die besten Sänger, die besten Sportler, die besten Romane und so fort.
10. Ich finde Schreiben sehr schwer, selbst wenn es nur darum geht, einem Freund zu schreiben, denn es ist so schwierig, genau die richtigen Worte zu finden. Ich mache oft mehrere Entwürfe, sogar von einfachen Sachen.
11. Bei allem, was ich tue, stelle ich an mich die höchsten Anforderungen.
12. Ich gebe mich nie mit dem Zweitbesten zufrieden.
13. Ich male mir oft Lebensweisen aus, die sich von meinem tatsächlichen Leben gründlich unterscheiden.

▷ ren. Sie opfern auch mehr Zeit, um ihre Kaufentscheidung mit der von anderen zu vergleichen.

Natürlich kann niemand jede Option überprüfen, aber Maximierer streben dieses Ziel an; dadurch wird die Entscheidung mit wachsendem Angebot immer mühsamer – und nach getroffener Wahl gehen ihnen die Alternativen, die sie aus Zeitmangel nicht erforschen konnten, nicht aus dem Kopf. Letztlich treffen sie zwar objektiv bessere Entscheidungen als die Genügsamen, sind aber weniger zufrieden damit.

Wir haben auch gefunden, dass die stärksten Maximierer mit den Früchten ihrer Anstrengung am wenigsten zufrieden sind. Wenn sie sich mit anderen vergleichen, macht es ihnen wenig Freude, besser abgeschnitten zu haben, aber großen Kummer, falls sie schlechter dran sind. Sie neigen stärker dazu, nach einem Kauf Reue zu empfinden, und wenn ihre Erwerbung sie enttäuscht, brauchen sie länger, bis sie sich wieder wohl fühlen. Auch neigen sie mehr zu fruchtlosem Grübeln als die Genügsamen.

Folgt daraus, dass Maximierer generell weniger glücklich sind als Genügsame? Wir ließen Testpersonen verschiedene Fragebögen ausfüllen, die als zuverlässige Indikatoren für Wohlbefinden gelten. Erwartungsgemäß waren Personen mit hohen Maximierungswerten weniger zufrieden mit ihrem Leben, weniger glücklich, pessimistischer und deprimierter als Personen am unteren Ende der Maximierungsskala. Tatsächlich hatten die extremen Maximierer Depressionswerte, die an der Grenze zur Krankheit liegen.

Anleitung zum Unglücklichsein

Es gibt verschiedene Gründe, warum größere Wahlfreiheit nicht immer besser ist als geringere – insbesondere für Maximierer. Eine große Rolle spielen dabei die so genannten Opportunitätskosten. Die Qualität einer bestimmten Option lässt sich nicht isoliert von ihren Alternativen bewerten. Eine der »Kosten«, die bei jeder Wahl entstehen, ist der Verlust der übrigen Möglichkeiten. Die fiktiven Kosten eines Urlaubs am Meer können etwa darin bestehen, dass man dafür die Sehenswürdigkeiten im Hinterland verpasst. Wenn wir annehmen, dass Opportunitätskosten die Attraktivität der bevorzugten Alternative reduzieren, dann wird unser Verlustgefühl umso stärker

sein, je mehr Alternativen es gibt – und umso weniger Befriedigung wird uns die endgültige Entscheidung verschaffen.

Lyle Brenner von der Universität von Florida und seine Mitarbeiter demonstrierten den Effekt von Opportunitätskosten, indem sie Versuchspersonen die Aufgabe stellten, Zeitschriftenabonnements oder Flüge von San Francisco zu attraktiven Zielorten mit einem Dollarwert zu versehen. Manche gaben einem einzelnen Abonnement oder einem einzelnen Flugziel einen Preis. Andere bewerteten dasselbe Magazin oder Flugziel als Teil einer Gruppe, die noch drei Alternativen enthielt. Ergebnis: Die fiktiven Preise lagen stets niedriger, wenn eine Option als Teil einer Gruppe bewertet wurde.

Warum mag das so sein? Wenn Sie einer Zeitschrift einen Wert als Teil einer Gruppe zuordnen, die noch drei weitere Magazine enthält, werden Sie wahrscheinlich die verschiedenen Alternativen vergleichen. Vielleicht bewerten Sie eine Zeitschrift als informativer, aber als weniger unterhaltsam. Jeder Vergleich, bei dem eine Zeitschrift gewinnt, wird ihren Wert steigern, aber jeder Vergleich, bei dem sie verliert, schlägt als Verlust zu Buche – als Opportunitätskosten. Jede einzelne Zeitschrift wird beim Vergleich mit anderen sowohl gewinnen als auch verlieren. Doch wie uns der Psychologe und Nobelpreisträger Daniel Kahneman von der Princeton-Universität und sein verstorbener Kollege Amos Tversky von der Stanford-Universität lehrten, haben Verluste – in diesem Fall fiktive Kosten – eine viel stärkere psychologische Wirkung als Gewinne. Verluste schmerzen uns mehr, als Gewinne uns freuen.

Große Auswahl – großer Frust?

Manchmal können Opportunitätskosten so stark Konflikte hervorrufen, dass sie lähmend wirken. In einer Studie wurde den Versuchsteilnehmern 1,50 Dollar für das Ausfüllen von Fragebögen versprochen. Nach Erledigen der Aufgabe wurde ihnen alternativ eine hübsche Füllfeder angeboten und mitgeteilt, sie koste normalerweise 2 Dollar. Fünfundsiebzig Prozent wählten den Füller. In einem zweiten Versuch wurde den Teilnehmern zunächst die 1,50 Dollar angeboten und dann wahlweise dieselbe Füllfeder und ein Paar billiger Filzstifte, die zusammen auch 2 Dollar wert waren. Nun wählten weniger als fünfzig Prozent irgendein Schreibgerät.

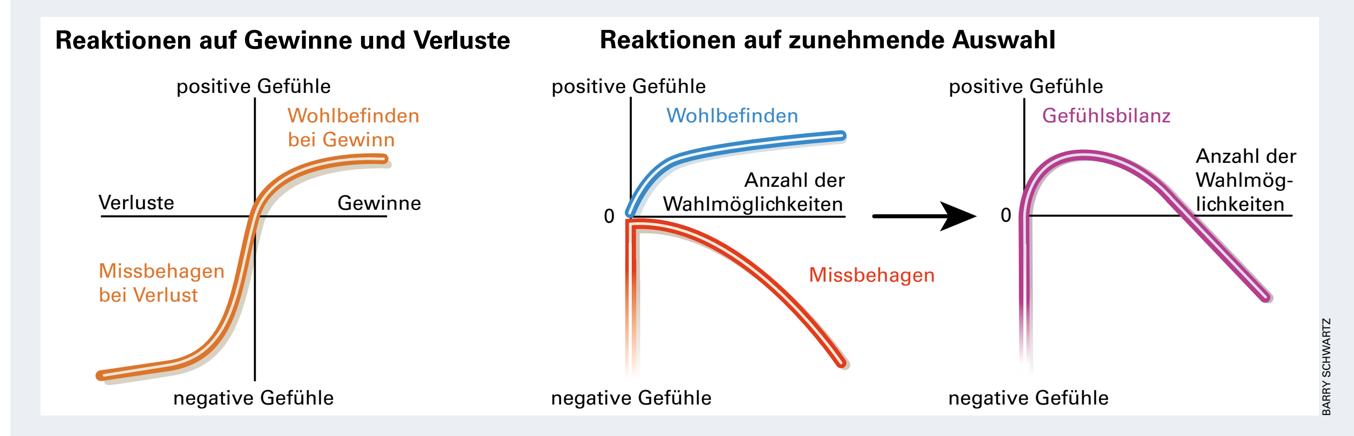
Das Problem der fiktiven Kosten wiegt für einen Maximierer viel schwerer als für einen Genügsamen: Der gibt sich schnell zufrieden und nimmt Gedanken über Opportunitätskosten auf die leichte Schulter. Außerdem neigt der Genügsame viel weniger zum Suchen und Prüfen von Alternativen als der penible Maximierer. Je weniger Wahlmöglichkeiten man in Betracht zieht, desto weniger Opportunitätskosten muss man abziehen.

Den Menschen tut es nicht nur Leid um die entgangenen Möglichkeiten, sondern oft bereuen sie auch die getroffene Entscheidung. Meine Kollegen und ich haben ein Maß für die Neigung zu solch nachträglichem Bedauern entwickelt und damit gezeigt, dass Personen mit hoher Reuebereitschaft weniger glücklich, weniger zufrieden mit ihrem Leben, weniger optimistisch und deprimierter sind als solche mit geringer Neigung zum Bereuen. Es überrascht auch nicht, dass Menschen, die besonders zum Bedauern ihrer Wahl neigen, in der Regel Maximierer sind. In der Tat glauben wir, dass Furcht vor künftiger Reue ein wichtiger Grund für das Maximierungsverhalten ist. Wenn man das Bedauern einer Entscheidung um jeden Preis vermeiden möchte, ist man gezwungen, die bestmögliche Wahl zu treffen. Doch leider wird man die Entscheidung umso wahrscheinlicher bereuen, je mehr Optionen es gibt und je mehr Opportunitätskosten man übernimmt.

Reue ist vermutlich ein Grund für unsere Aversion gegen Verluste. Haben Sie schon einmal ein Paar teure Schuhe gekauft und nach zehn Minuten darin vor Schmerzen zu hinken begonnen? ▷

Wechselnde Gefühle bei wachsender Auswahl

Wie ältere Forschungen zum Entscheidungsverhalten gezeigt haben, reagieren die Menschen auf Verluste viel stärker als auf Gewinne (im linken Diagramm schematisch dargestellt). Entsprechend glauben meine Mitarbeiter und ich, dass mit wachsender Auswahl das Wohlbefinden (die blaue Linie im mittleren Diagramm) zunächst steil ansteigt, dann aber bald abflacht, weil positive Gefühle zur Sättigung neigen. Anders die negativen Gefühle (rote Linie): Keinerlei Auswahlmöglichkeit macht praktisch unendlich unglücklich (negative y-Achse), doch das Missbehagen eskaliert auch, wenn die Anzahl der Auswahlmöglichkeiten immer mehr ansteigt. Als Nettoeffekt (violette Linie im rechten Diagramm) ergibt sich, dass ab einem gewissen Punkt weitere Auswahlangebote die Zufriedenheit mindern und schließlich sogar immer tieferes Missbehagen erzeugen.



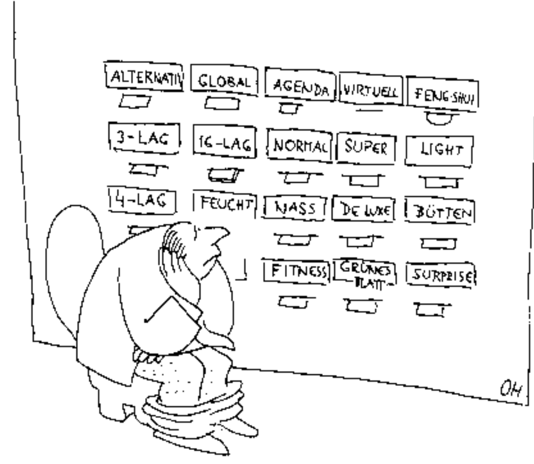
▷ Haben Sie die unbequemen Schuhe gleich weggeworfen – oder liegen sie noch immer hinten im Schrank? Vermutlich ist Ihnen das Wegwerfen allzu schwer gefallen. Durch den Schuhkauf sind Ihnen nämlich echte Kosten entstanden, und Sie behalten die Schuhe, weil Sie hoffen, irgendwann würden sie doch noch ihr Geld wert sein. Die Schuhe zu verschenken oder wegzuwerfen würde Sie zwingen, einen Fehler zuzugeben – einen Verlust.

In einem klassischen Experiment zur Macht echter Kosten wurde den Testpersonen ein Theaterabonnement angeboten. Manche erhielten die Karten zum vollen Preis, andere mit Rabatt. Dann kontrollierten die Forscher einfach, wie oft die Kartenbesitzer wirklich ins Theater gingen. Das Resultat: Wer den vollen Preis bezahlt hatte, machte eher von den Karten Gebrauch. Den Grund dafür sahen die Forscher darin, dass die Vollpreiszahler mehr Reue empfanden, wenn sie die Karten nicht nutzten – denn das Verfallen der teureren Karten bedeutete einen größeren Verlust.

Mehreren Studien zufolge wird das Gefühl der Reue zum einen stärker, je mehr man sich für das Resultat persönlich verantwortlich fühlt, und zum anderen, je leichter man sich eine bessere Alternative vorstellen kann. Ein Auswahlangebot verschlimmert offensichtlich beide Faktoren. Was kann man schon groß anstellen, wenn man keine Wahl hat? Vielleicht ist man enttäuscht, aber Reue empfindet man nicht. Wenn es hingegen viele Optionen gibt, wächst das Risiko, dass man meint, eine besonders gute übersehen zu haben, und dies nun bereut.

Auch das Phänomen der Gewöhnung trübt den Genuss allzu vieler Wahlmöglichkeiten. Weil wir uns mit der Zeit an die Dinge des Lebens gewöhnt haben, erfüllt das meiste nicht mehr unsere Erwartungen. Angenommen, nach langem Hin und Her entscheiden Sie sich, ein teures Auto zu kaufen, und versuchen dann, alle anderen attraktiven Modelle aus Ihren Gedanken zu verdrängen. Aber sobald Sie den neuen Wagen fahren, beginnt die Gewöhnung, und das Erlebnis wird ein wenig schal. Sie bereuen nicht nur, dass Sie kein anderes Auto gewählt haben, sondern sind noch zusätzlich enttäuscht von dem, das Sie ausgesucht haben – selbst wenn Ihre endgültige Entscheidung gar nicht schlecht war.

Auf Grund der Gewöhnung hält Enthusiasmus über positive Erlebnisse nicht lange an. Wie Daniel T. Gilbert von der Harvard-Universität und Timothy D. Wilson von der Universität von Virginia gezeigt haben, sehen Versuchspersonen nie richtig voraus, wie lange sie sich nach guten Erfahrungen wohl fühlen werden und wie lange das Missbehagen nach schlechten Erlebnissen andauern wird. Freude und Genuss scheinen immer überraschend schnell zu schwinden.



Dies gilt insbesondere in einer Welt mit vielen Alternativen. Die Opportunitätskosten einer Entscheidung sowie die dafür aufgewendete Zeit und Mühe sind »Fixkosten«, die wir im Voraus »bezahlen«, und diese Kosten »amortisieren« sich durch den Genuss der Entscheidung. Je mehr wir in eine Entscheidung investieren, desto mehr Befriedigung erwarten wir von unserer Investition.

Wenn eine Auswahl noch lange, nachdem sie getroffen wurde, Befriedigung verschafft, werden die aufgewandten Kosten bedeutungslos. Doch wenn die Entscheidung nur kurz Freude bereitet, wiegen diese Kosten schwer. Wer monatelang überlegt, welche Stereoanlage er kaufen soll, findet das nicht zu viel, wenn er die Anlage fünfzehn Jahre lang richtig genießen kann. Aber wenn er letztlich nur sechs Monate davon begeistert ist und sich dann daran gewöhnt, kommt er sich vielleicht wie ein Dummkopf vor.

Ein Übermaß an Alternativen kann auch noch dadurch Kummer bereiten, dass es allzu hohe Erwartungen weckt. Im Herbst 1999 forderte die »New York Times« Teenager auf, ihre eigenen Erfahrungen mit den Jugenderinnerungen ihrer Eltern zu vergleichen. Fünfzig Prozent der Kinder aus wohlhabendem Haus sagten, ihr eigenes Leben sei härter.

Der Fluch zu hoher Erwartungen

Auf Nachfrage nannten die Jugendlichen hohe Erwartungen – sowohl ihre eigenen als auch die ihrer Eltern. Sie erklärten, ihnen sei alles zu viel: zu viele Aktivitäten, zu viele Konsumentscheidungen, zu viel zu lernen. Ein Kommentator meinte, die Kinder stünden unter dem Druck, nur ja nicht zurückzufallen; alles drehe sich darum, voranzukommen; Zurückfallen sei der amerikanische Albtraum.

Die große Auswahl, die uns heute in den meisten Lebensbereichen geboten wird, erhöht das Anspruchsniveau. Als

Maßnahmen gegen Auswahlstress



MATT COLLINS

Wählen Sie, wann Sie wählen wollen.
Wir können uns entschließen, unsere Optionen einzuschränken, wenn die Entscheidung nicht sehr wichtig ist. Machen Sie es sich beispielsweise zur Regel, beim Kauf von Kleidung nicht mehr als zwei Kaufhäuser aufzusuchen.

Lernen Sie, Ausreichendes (»Good enough«) zu akzeptieren.
Begnügen Sie sich mit einer Wahl, die Ihre Hauptanforderung erfüllt, statt lange nach dem kaum erreichbaren Allerbesten zu suchen. Und hören Sie auf, daran zu denken.

Kümmern Sie sich nicht um das, was Sie versäumen.
Schränken Sie bewusst Ihre Grübeleien über scheinbar attraktive Eigenschaften von Optionen ein, die Sie verwerfen. Lernen Sie, sich auf die positiven Aspekte der getroffenen Wahl zu konzentrieren.

Dämpfen Sie Ihre Erwartungen.
»Wer nicht zu viel erwartet, wird nicht enttäuscht.« Das mag zwar ein Gemeinplatz sein, ist aber ein vernünftiger Rat, wenn Sie mit dem Leben zufriedener sein wollen.

ich vor einigen Jahren in einem winzigen Küstendorf in Oregon Urlaub machte, ging ich in den einzigen Kaufladen des Orts, um für das Abendessen einzukaufen. Der Laden bot immerhin rund ein Dutzend Weine an. Was ich bekam, war nichts Besonderes, aber da ich nichts anderes erwartet hatte, war ich damit zufrieden. Hätte ich stattdessen in einem Supermarkt mit riesiger Auswahl eingekauft, wären meine Erwartungen viel höher gewesen und derselbe Wein hätte mich schwer enttäuscht.

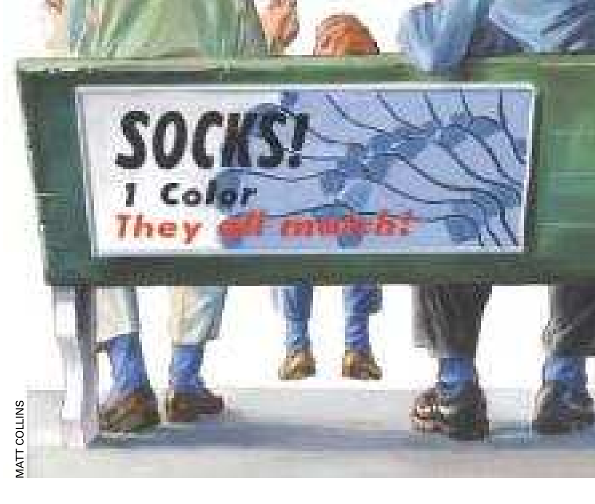
Alex C. Michalos von der Universität von Northern British Columbia hat darauf hingewiesen, dass all unsere Bewertungen auf Vergleichen beruhen – mit früheren Erlebnissen, Hoffnungen und Erwartungen. Wenn wir sagen, eine Erfahrung sei gut gewesen, dann meinen wir eigentlich, dass sie besser war als erwartet. Darum garantieren hohe Erwartungen geradezu, dass die Erfahrungen dahinter zurückbleiben. Das gilt insbesondere für Maximierer und vor allem dann, wenn Reue, Opportunitätskosten und Gewöhnung nicht in die Erwartungen einkalkuliert werden.

Die Folgen unbegrenzter Auswahl reichen von milder Enttäuschung bis zu echtem Leid. Wie schon erwähnt, nimmt in den Industrieländern das Wohlbefinden tendenziell ab und die klinische Depression zu. Einen wichtigen Grund dafür sehe ich darin, dass wir uns selbst die Schuld geben, wenn die Konsequenzen unserer Entscheidungen nicht den Erwartungen entsprechen. Enttäuschende Ergebnisse wirken als persönliches Versagen, das wir durch eine bessere Wahl hätten vermeiden können und sollen.

Unsere Forschung belegt, dass Maximierer besonders anfällig für Depression sind. Bei den unterschiedlichsten Gruppen von Testpersonen, sortiert nach Alter – unter anderem Teenager –, Geschlecht, Bildungsgrad, Wohnort und sozioökonomischem Status, fanden wir immer wieder eine starke Korrelation zwischen Maximieren und Anzeichen für Depression.

Wenn praktisch jede getroffene Wahl nicht den Erwartungen und Hoffnungen entspricht und man sich obendrein permanent persönlich dafür verantwortlich fühlt, nehmen die Enttäuschungen überhaupt kein Ende mehr. Mit der Zeit erscheint alles öde und belanglos, und das Gefühl, gar nichts richtig machen zu können, wirkt niederschmetternd. Obwohl Depression viele Ursachen hat – und obwohl die Beziehung zwischen Auswahl und Depression weiter erforscht werden muss –, trägt das Übermaß an Angeboten offensichtlich zu dem Unbehagen bei, das sich in den modernen Gesellschaften epidemisch ausbreitet.

Ein nicht ganz ernst gemeinter Rat: Kaufen Sie Socken stets in einer Farbe! Der Vorteil: Alle passen garantiert zusammen.



MATT COLLINS

Allzu viel ist ungesund

Der Zusammenhang zwischen Wahl und Wohlbefinden ist kompliziert. Ein Dasein ohne echte Entscheidungsfreiheit wäre nicht lebenswert. Die Fähigkeit, unter mehreren Möglichkeiten zu wählen, hat äußerst positive Effekte – allerdings nur bis zu einem gewissen Punkt. Wenn die Anzahl der Wahlmöglichkeiten immer weiter zunimmt, beginnt der psychologische Nutzen, den wir daraus ziehen, allmählich abzuflachen. Zugleich tauchen zunehmend negative Entscheidungseffekte auf.

Vor einem Vierteljahrhundert bemerkten der verstorbene Clyde H. Coombs von der Universität von Michigan in Ann Arbor und George S. Avrunin von der Universität von Massachusetts in Amherst: Gutes »sättigt« und Schlechtes »eskaliert«. Das gilt auch für Gefühle. In der Tat ist insbesondere in den USA offenbar längst ein Punkt erreicht, bei dem ein Zuwachs an Angeboten nicht Chancen eröffnet, sondern Trübsal verbreitet.

Wohl kaum jemand wäre dafür, Auswahlmöglichkeiten generell – etwa per Gesetz – einzuschränken. Doch sicherlich kann jeder für sich Maßnahmen ergreifen, um den durch exzessive Angebotsvielfalt verursachten Stress zu lindern. Das erfordert Übung, Disziplin und vielleicht eine neue Denkungsart – aber jeder einzelne dieser Schritte dürfte sich lohnen (siehe Kasten auf der gegenüberliegenden Seite).

Abgesehen von solchen individuellen Strategien meine ich, unsere Gesellschaft wäre gut beraten, ihre Anbetung der unbegrenzten Wahlfreiheit zu überdenken. Derzeit wird in praktisch allen Industrieländern heftig für die Privatisierung der Sozialversicherung gestritten – die Leute sollen selbst wählen, wie viel sie in ihre Altersvorsorge einzahlen möchten –, für die Privatisierung der medizinischen Versorgung und das Bezahlen rezeptpflichtiger Medikamente aus eigener Tasche – die Leute sollen selbst entscheiden, was ihnen ihre Gesundheit wert ist – und für mehr Wahlfreiheit im Bildungswesen.

Manche Medizinethiker idealisieren den »autonomen Patienten«, als wäre völlig unstrittig, dass Kranke besser dran sind, wenn sie ihre Behandlung selbst aussuchen müssen. Softwareentwickler gestalten ihre Produkte möglichst so, dass jeder Benutzer sie nach Belieben seinen eigenen Ansprüchen und seinem Geschmack anzupassen vermag – als wäre Kompliziertheit und Verwirrung nun einmal der Preis, der für maximale Flexibilität zu zahlen ist. Unentwegt werfen die Hersteller neue Produkte – oder neue Versionen alter Produkte – auf den Markt, als bräuchten wir mehr Vielfalt. Wie aus meinen Forschungen hervorgeht, beruhen die Entwicklungen in all diesen Bereichen wahrscheinlich auf zutiefst falschen Annahmen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Barry Schwartz ist Professor für Psychologie am Swarthmore College im US-Bundesstaat Pennsylvania; dort lehrt er seit 1971. Er ist Autor mehrerer Bücher, unter anderem »The battle for human nature« und »The costs of living«.

Die Psychologie der Entscheidung. Von Helmut Jungermann, Hans-Rüdiger Pfister und Katrin Fischer. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1998

The paradox of choice: Why more is less. Von Barry Schwartz. Ecco/HarperCollins Publishers, 2004

Maximizing versus satisficing: Happiness is a matter of choice. Von Barry Schwartz et al., in: Journal of Personality and Social Psychology, Bd. 83, S. 1178 (2002)

The loss of happiness in market democracies. Von Robert E. Lane. Yale University Press, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der schwierige Weg von Ptolemäus zu Kopernikus

Muslimische Astronomen übersetzten im Mittelalter nicht nur die astronomischen Werke der Griechen ins Arabische. Möglicherweise beeinflussten sie sogar maßgeblich die kopernikanische Wende unseres Weltbilds.

Von George Saliba

Zwei renommierte Wissenschaftshistoriker begutachteten im Jahr 1957 eine alte Handschrift, die ein arabischer Astronom im 14. Jahrhundert verfasst hatte. Was Otto E. Neugebauer von der Brown-Universität in Providence (Rhode-Island) und Edward S. Kennedy von der Amerikanischen Universität in Beirut in Händen hielten, war den meisten Fachkollegen völlig unbekannt – und gar zu unglaublich schien der Inhalt. Die Schrift stammte von einem Mann names Ibn ash-Shatir, der in der Omaijadenmoschee in Damaskus für die Einhaltung der Gebetszeiten zuständig war. Das Verblüffende an dem Text: Eindeutig antizipierte er einige der Ideen von Kopernikus – mehr als 100 Jahre vor der Geburt des Astronomen, der als Begründer des modernen Weltbilds gilt.

Als die beiden Historiker die Schriften Ibn ash-Shatirs das erste Mal ihren Kollegen präsentierten, reichten die Reaktionen von grenzenlosem Erstaunen bis zu vehementer Ablehnung – manche verließen sogar aus Protest den Hörsaal, sobald das Manuskript auch nur erwähnt wurde. Immerhin legte die Entdeckung dieser Handschrift nahe, dass Kopernikus womöglich nicht völlig allein auf seine bahnbrechenden Ideen gekommen war. Einige Historiker suchten Zuflucht in der Vorstellung, Kopernikus und Ibn ash-Shatir wären völlig unabhängig zu den gleichen Ergebnissen gelangt, wie das gelegentlich in der Wissenschaftsgeschichte ja der Fall ist. Mit der Zeit jedoch zeichnete sich eine verborgene Beziehung zwischen den Arbeiten von Kopernikus und denen der mittelalterlichen islamischen Astronomen ab. Wenn man Ibn ash-Shatirs Arbeit anerkennt, muss man auch akzeptieren, dass manche Erkenntnisse, die gemeinhin der abendländischen Renaissance zugeschrieben werden, ihren Ursprung außerhalb Europas haben könnten.

Dies alles strapaziert das immer noch gängige Bild, dem zufolge die islamisch-arabischen Gelehrten wissenschaftliche Erkenntnis wie eine Art Staffelholz von den antiken Griechen ans mittelalterliche Europa weiterreichten. Eine Heerschar von Schreibern habe zwar das Schrifttum der griechischen Astronomie, Philosophie und Medizin sorgfältig übersetzt und so vor dem Vergessen bewahrt, ansonsten aber unverändert in eine Zeit hinübergerettet, in der das aus seiner Dunkelheit erwachende Europa das Gedankengut schließlich aufnahm und weiterentwickelte. Eine solch vereinfachte Sichtweise würde die Rolle der islamischen Kultur innerhalb der Wissenschaftsgeschichte verkennen und die oftmals tief greifende Wechselbeziehung zwischen verschiedenen Kulturen und intellektuellen Strömungen unterschätzen.

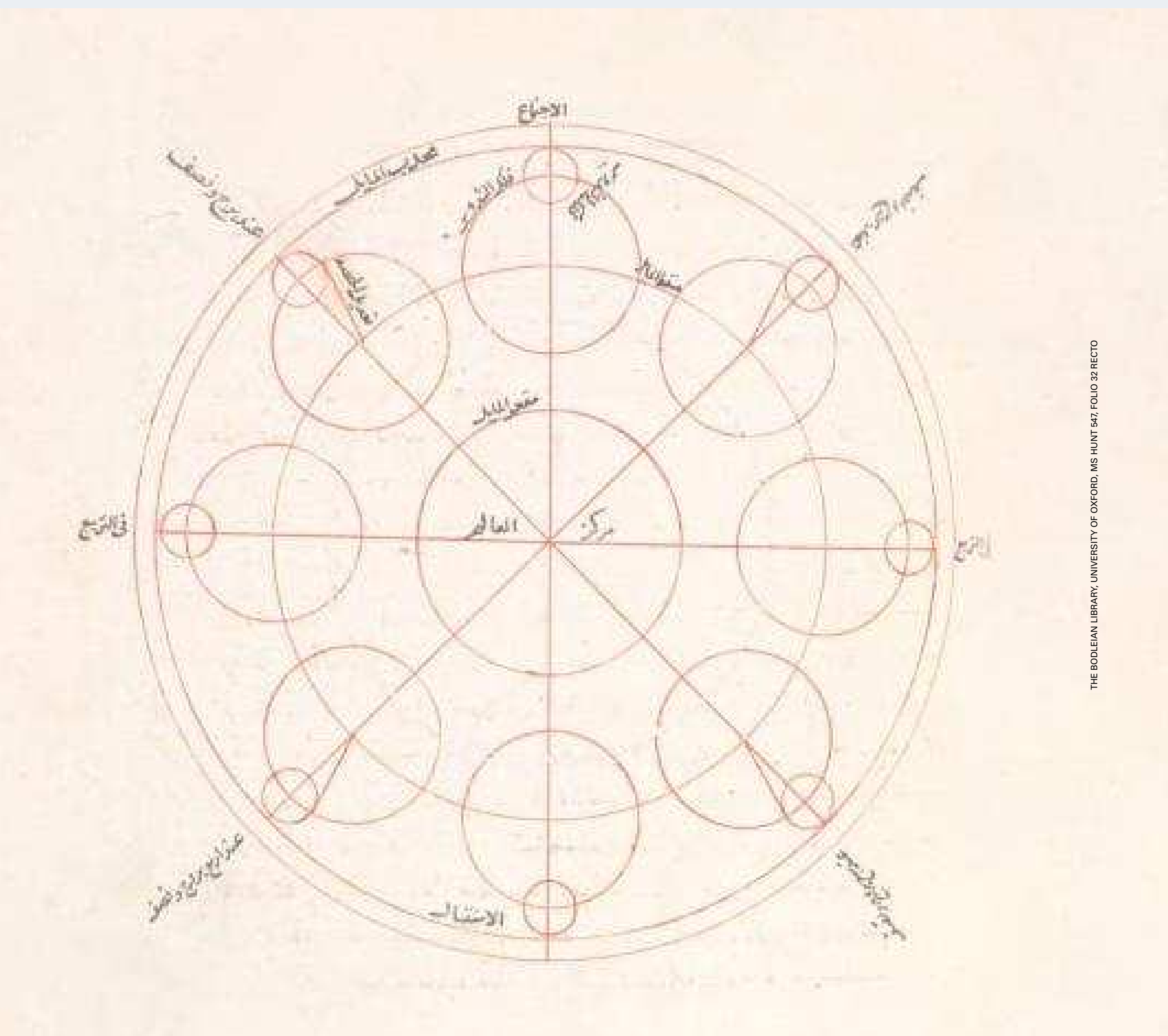
Immer Ärger mit Ptolemäus

Also was hatten die islamischen Astronomen noch erreicht? Hat noch anderes Wissen seinen Weg nach Europa gefunden, ohne je als solches anerkannt zu werden?

Es ist nicht leicht, die weit verstreuten Teile der Geschichte zusammenzusetzen. Tausende von arabischen wissenschaftlichen Texten lagern in den großen Bibliotheken der Welt, vom irischen Dublin bis zum südindischen Madras. Viele davon sind – wie das Manuskript Ibn ash-Shatirs – den Forschern bisher entgangen. Entgegen der traditionellen Sichtweise, der zufolge die mittelalterliche islamische Gesellschaft die Grundzüge der griechischen Astronomie als die reine Wahrheit angesehen habe, legt das, was die Historiker inzwischen zusammengepuzzelt haben, ein anderes Bild

IN KÜRZE

- **Das astronomische Weltbild,** das die Griechen der Antike entwickelten, war voller Inkonsistenzen. Arabische Astronomen mühten sich jahrhundertelang, diese Fehler auszumerzen.
- Das Verblüffende daran: Einige der arabischen Gelehrten entwickelten Ideen, die sich später in Kopernikus' bahnbrechendem Werk »De revolutionibus orbium coelestium« wieder finden, in dem er das **heliozentrische Weltbild** begründete. Kannte der im Ermland tätige Astronom etwa die Schriften seiner orientalischen Vorgänger?



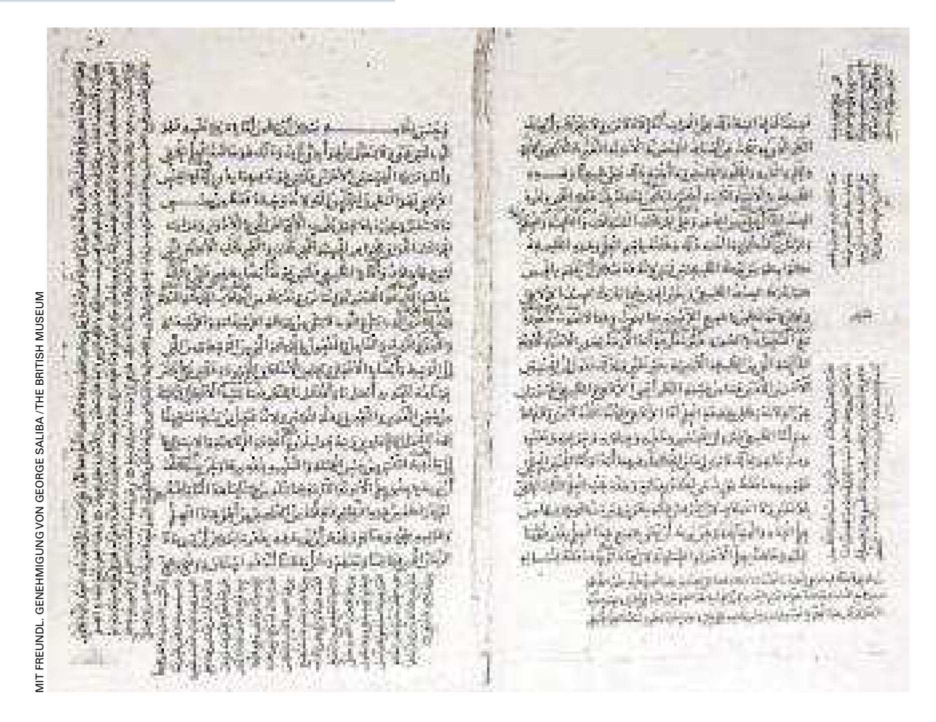
THE BODLEIAN LIBRARY, UNIVERSITY OF OXFORD, MS HUNT 547, FOLIO 32 RECTO

Dieses Modell für die Bewegung des Monds am Himmel, wie es der islamische Astronom Ibn ash-Shatir im 14. Jahrhundert vorschlug, ist identisch mit dem von Kopernikus nahezu zwei Jahrhunderte später. Kopernikus erwähnte in seiner Darlegung des heliozentrischen Weltbilds weder Ibn ash-Shatir noch die anderen arabischen Astronomen, die einige seiner Ideen zur Erklärung der Planetenbewegungen antizipierten. In dieser Skizze liegt die Sphäre des Monds auf dem rotierenden Umfang des kleinsten Kreises. Er wird auf acht Positionen entlang seiner Bahn um die Erde gezeigt. Ibn ash-Shatirs Modell verbesserte die Beschreibung der Mondbewegung erheblich, die der griechische Astronom Ptolemäus im 2. Jahrhundert verfasste.

nahe: Die arabischen Astronomen hinterfragten vieles und versuchten selbst, eine neue Astronomie zu begründen. Manche dieser Ideen wurden später von Kopernikus aufgegriffen, der die tradierte griechische Astronomie auf eigene Weise stürzte.

Die antike griechische Astronomie ist vor allem mit dem Namen eines Mannes verbunden: Ptolemäus. Im 2. Jahrhundert n. Chr. fasste dieser alexandrinische Gelehrte das astronomische Wissen seiner Zeit zusammen. Seine bedeutendsten Werke sind heute unter den Namen »Almagest«, »Hypothesen der Planeten«, »Phasen der Fixsterne« und »Planisphaerium« bekannt. Sieben Jahrhunderte hatte es gedauert, bis seine Schriften die islamische Welt erreichten. In dieser Zeitspanne scheint es relativ wenige neue wissenschaftliche Erkenntnisse gegeben zu haben.

Das große Interesse der islamischen Gelehrten des 9. Jahrhunderts an der antiken Wissenschaft ist zumindest teilweise der schnellen Ausbreitung des Islams zuzuschreiben. Die neu eroberten Gebiete erforderten nämlich einen beispiellosen Verwaltungsaufwand, der wiederum hoch entwickelter Formen von Wissenschaft und Technik bedurfte. Aus Ptolemäus' Schriften entnahmen die Muslime die Gesetzmäßigkeiten der Geometrie, ▷



Die arabischen Übersetzungen von Ptolemäus' Almagest wurden mit umfangreichen Anmerkungen versehen, wie die Kommentare auf den Rändern dieser Seiten zeigen. Unmittelbar nach Bekanntwerden der ptolemäischen Schriften in der islamischen Welt Anfang des 9. Jahrhunderts wurden sie kritisch gelesen.

mit deren Hilfe sie die Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten gegenüber den Fixsternen vorhersagen konnten. Mit diesem nützlichen Werkzeug legten sie unter anderem den Mondkalender fest, bestimmten die Zeiten für die täglichen Gebete und konnten auch fern von Mekka die vorgeschriebene Gebetsrichtung, die so genannte Kibla, ermitteln.

Der Übersetzungsaufwand war enorm. An mehreren Orten befanden sich Einrichtungen – wie das berühmte Haus der Weisheit in Bagdad –, an denen islamische Gelehrte die griechischen Werke ins Arabische übertrugen. Einige dieser arabischen Übersetzungen wurden nach der Reconquista in Spanien der abendländischen Kultur zugänglich und ins Lateinische übertragen. In griechischer Sprache verfasste Handschriften haben nur vereinzelt bis in das späte Mittelalter überdauert – zum Beispiel der Almagest. Die anderen Werke wären ohne ihre arabische Übersetzung verloren gewesen. Zweifellos ist es ein wichtiges Verdienst der islamischen Gelehrten, diese Schriften bewahrt zu haben. Doch schon von Anfang an erstellten die Übersetzer mehr als nur wörtliche Übertragungen: Sie nahmen sich die Freiheit, die Texte zu kommentieren und zu korrigieren (Bild links). Manche offenkundigen Fehler in den griechischen Manuskripten ließen sich leicht berichtigen, aber manch anderes sorgte für heftiges Stirnrunzeln.

So mussten, um eine praktische Anwendung zu ermöglichen, bestimmte Angaben korrigiert werden. Dies betraf zum Beispiel die Präzessionsbewegung der Erdachse, durch die sich die Lage des Himmelsäquators gegenüber der Ekliptik – der Bahn der Sonne am Firmament – im Laufe der Zeit verschiebt. Legte man Ptolemäus' Angaben zu Grunde, dann hätte sich in den 700 Jahren seit seinem Wirken der Schnittpunkt von Himmelsäquator und Ekliptik um sieben Grad verschieben müssen. Doch die Astronomen in Bagdad ermittelten eine Verschiebung von zehn bis elf Grad.

Auch die Inklination der Erde, also die Neigung der Äquatorebene gegenüber der Ekliptik, war Ptolemäus nicht sehr genau bekannt gewesen. Der Wert, den die Astronomen des 9. Jahrhunderts gemessen haben, stimmt viel genauer mit dem heute akzeptierten Wert überein. Ferner ermittelte Ptolemäus auch eine feste Position für das »solare Apogäum« – die maximale Entfernung der Sonne von der Erde in ihrem »geozentrischen Orbit«. (Araber, wie auch Ptolemäus, gingen von einem geozentrischen Universum aus, in dem alle Himmelskörper – einschließlich der Sonne – um die Erde kreisen.) Aber die islamischen Astronomen beobachteten, dass sich das Apogäum der Sonne während der 700 Jahre um ungefähr 10 Grad verschoben hatte und dass diese Verschiebung mehr oder weniger der Präzessionsbewegung entsprach.

Der scheinbare Lauf der Sonne

Der Umlauf der Erde um die Sonne gaukelt dem Beobachter verschiedene scheinbare Bewegungen vor. Im Laufe eines Jahres scheint die Sonne einmal von West nach Ost über den Himmel zu ziehen, entlang einer Bahn, der Ekliptik, die durch die zwölf Sternbilder des Tierkreises führt. Die Sonnenwenden zeigen die Zeiten des Jahres an, in denen die Sonne ihre größte beziehungsweise kleinste Mittagshöhe erreicht. Die Tagundnachtgleichen markieren die Punkte, in denen der Himmelsäquator (die Projektion des Erdäquators an den Himmel) die Ekliptik schneidet. Die Astronomen des antiken Griechenlands und der mittelalterlichen islamischen Welt versuchten diese Phänomene in einem geozentrischen Weltbild zu erklären.

Die arabischen Astronomen umgingen diese Ungereimtheiten, indem sie für ihre Bedürfnisse eigene astronomische Tabellen erstellten. Doch die Entdeckung fundamentaler Fehler in Ptolemäus' Werken zog weitere Fragen an das astronomische Vermächtnis der Griechen nach sich. Waren Ptolemäus' Instrumente der Grund für die Ungenauigkeiten? Waren seine Beobachtungsmethoden fehlerhaft? War vielleicht etwas ganz anderes die Ursache? Solche Fragen boten genug Anlass, jeden Aspekt der griechischen Astronomie einer genauen Revision zu unterziehen.

Im Laufe der Zeit konnten die theoretisch arbeitenden Astronomen rund um die Quelle der ptolemäischen Fehler einige der strittigen Fragen aussortieren. So wiesen sie zum Beispiel nach, dass seine Beobachtungstechniken einiges zu wünschen übrig ließen. Ptolemäus' Berechnungen der solaren Exzentrizität (eine Beschreibung ihres scheinbaren Orbits) und die Position ihres Apogäums waren falsch, weil er die Sonne nur an vier Punkten beobachtet hatte: den zwei Tagundnachtgleichen und den beiden Sonnenwenden. Problematisch sind die Sonnenwenden im Juni und Dezember, da sich die Auf- und Untergangspunkte der Sonne am Horizont über einige Tage hinweg kaum ändern. Dadurch ist das genaue Datum der Sonnenwende sehr schwer zu bestimmen. Die islamischen Astronomen erkannten, dass man inmitten der Jahreszeiten (wenn die Sonne durch die Sternbilder Stier, Löwe, Skorpion beziehungsweise Wassermann zieht) präziser beobachten kann. Mit einem Streich hatten sie Ptolemäus' Methodik verbessert sowie das Problem der Exzentrizität und des Apogäums der Sonnenbahn gelöst.

Rätseln über den Aufbau der Welt

Die Theoretiker entwickelten zudem ein starkes Interesse an den kosmologischen Grundlagen der ptolemäischen Astronomie. Ptolemäus hatte seine Kosmologie von dem Philosophen Aristoteles übernommen, der die Planeten und die Sterne in konzentrischen Himmelssphären eingebettet sah, in deren Mittelpunkt die Erde stand. Diese Sphären und die Himmelskörper sollten aus einem einzigen, einfachen »Element« bestehen: dem Äther. Im Gegensatz zu den anderen damals angenommenen Elementen – Erde, Wasser, Luft und Feuer – galt der Äther als rein und göttlich, als frei von weltlichen Eigenschaften wie etwa der Reibung. Diese Auffassung hatte durchaus etwas für sich, sodass Ptolemäus Aristoteles' Elemente unreflektiert übernahm.

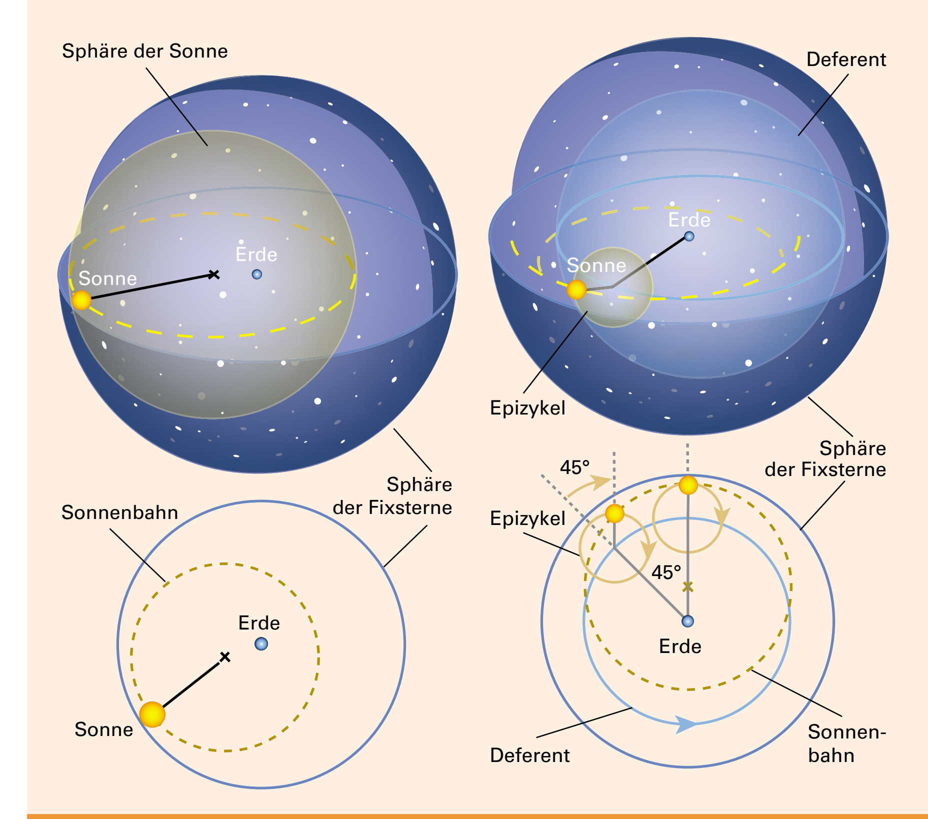
Die Schwierigkeiten begannen, als Ptolemäus versuchte, die Himmelsmechanik im Rahmen der aristotelischen Kosmologie zu erklären. Ptolemäus ging von einer äußersten, neunten Sphäre aus, die für die Bewegung der benachbarten, die Fixsterne tragenden achten Sphäre sorgte. So konnte er das Phänomen der Präzession beschreiben. Als der arabische Astronom Muhammad ibn Musa im 9. Jahrhundert über eine solche Sphäre nachdachte, erkannte er, dass diese Erklärung unmöglich ist. Wie sollte eine reibungsfreie Sphäre die andere bewegen, wenn sich beide um dasselbe Zentrum drehten?

Zweifel offenbaren Inkonsistenzen

Diese Frage löste unter den islamischen Gelehrten eine philosophische Debatte aus. Was genau war denn der Äther? Was war die wahre Natur der Sphären? Konnten die Himmelskörper Eigenschaften haben, die ihrer ursprünglich definierten Natur widersprachen? In gewisser Hinsicht wurde die Suche nach Konsistenz zwischen der ursprünglichen Definition der Himmelskörper und ihren offensichtlichen Eigenschaften die Hauptsorge der ▷

Exzenter- kontra Epizykelmodell

Ptolemäus skizzierte zwei geozentrische Modelle, mit denen er die Bewegung der Sonne zu erklären suchte, die sich im Jahresverlauf mit unterschiedlicher Geschwindigkeit über das Firmament bewegt. Im Exzenter-Modell (links) ist die Sonnenbahn zwar ein Kreis, aber dessen Mittelpunkt fällt nicht mit der Position der Erde zusammen. Das Epizykelmodell (rechts) sah eine tragende Sphäre vor – den Deferenten – mit der Erde im Mittelpunkt, setzte die Sonne aber auf eine Hilfssphäre, den Epizykel, die vom Deferenten getragen wurde. (Bewegt sich der Deferent um 45° im Gegenuhrzeigersinn, so rotiert der Epizykel um den gleichen Betrag in die andere Richtung.) Obwohl beide Modelle die beobachtete Bewegung der Sonne gleich gut erklären konnten, so verletzten sie doch die aristotelische Kosmologie, da der Systemschwerpunkt außerhalb der Erde lag. Ptolemäus selbst verschwieg diese Problematik, aber arabische Astronomen waren von dieser Inkonsistenz beunruhigt.



arabischen Astronomie. Dies war wohl der grundlegende Unterschied zwischen den islamischen Astronomen und ihren griechischen Vorgängern.

Nach Aufkommen der ersten Zweifel erkannten die islamischen Gelehrten bald, dass das Weltbild der griechischen Astronomen zahlreiche Absurditäten enthielt. Sie sahen sich in eine Rolle als Reformer und Schöpfer einer widerspruchsfreien Astronomie gedrängt. Allerdings war der Weg dorthin weit. Generationen von Gelehrten waren nötig, die richtigen Fragen zu stellen, und weitere Generationen, die Antworten zu finden und eine alternative Himmelskunde zu entwickeln – eine, die das revolutionäre Weltbild des Kopernikus vorbereitete.

Sphären sollen es erklären

Auch wenn Ptolemäus zahlreichen Irrtümern aufgesessen war: Wir sollten ihn und seine Nachfolger nicht zu schnell als naiv einschätzen, nur weil sie an der Vorstellung der aristotelischen Sphären und einem geozentrischen Universum festhielten. Trotz aller Unzulänglichkeiten beschrieb dieses Weltbild recht genau die Beobachtungen, und es erlaubte, die Positionen der Planeten für jeden beliebigen Zeitpunkt und für jeden Ort vorherzusagen. Solange die Schwerkraft als eigentliche Ursache der Planetenbewegung unbekannt war – das Gravitationsgesetz formulierte Isaac Newton erst im 17. Jahrhundert –, gab es kein anderes Weltbild, das einen so großen Teil des beobachtbaren Universums systematisch beschreiben konnte.

Bis zu einem gewissen Grad müssen bereits Ptolemäus die Schwierigkeiten aufgefallen sein, die aus einer strengen Anlehnung an die aristotelische Kosmologie resultierten. Er konnte selbst die einfachsten Planetenbewegungen nicht erklären, ohne Aristoteles' Beschränkungen aufzuweichen. Betrachten wir beispielsweise den scheinbaren Umlauf der Sonne. Stünde die Erde genau im Zentrum ihrer Himmelssphäre, so müsste sich die Sonne das ganze Jahr über gleichmäßig über das Firmament bewegen, denn ihre Entfernung von uns wäre konstant. Die Wirklichkeit ist anders: Während der Frühlings- und Sommermonate auf der Nordhalbkugel scheint die Sonne langsamer zu laufen als im Herbst und Winter. (Natürlich wissen wir heute, dass der Frühling und der Sommer deswegen mehr Tage haben als der Herbst und der Winter, weil in dieser Zeit die Erde am weitesten von der Sonne entfernt ist und so der Lauf zwischen den Tagundnachtgleichen länger dauert.)

Ptolemäus behandelt dieses Problem in Buch III des aus dreizehn »Büchern« bestehenden Almagest. Er stellt dort den Lesern zwei Erklärungsmodelle für die unterschiedliche Dauer der Jahreszeiten vor (Kasten auf S. 79). Sein Exzentermodell besagt, dass der Mittelpunkt der Erde nicht mit dem Mittelpunkt der die Sonne in ihrem Jahreslauf tragenden Sphäre zusammenfällt. Demnach würde die Sonne auf ihrer Bahn um die Erde einen Teil des Jahres als weiter weg (und damit langsamer) erscheinen. In seinem Epizykelmodell nahm Ptolemäus eine tragende Sphäre an (die er später Deferent nannte), deren Zentrum im Erdmittelpunkt liegt. Die Sonne setzte er auf eine zweite Sphäre, Epizykel genannt, die vom Deferenten getragen wurde und deren Radius der Exzentrizität im Exzentermodell entsprach. Wenn Deferent und Epizykel sich mit gleicher Geschwindigkeit, aber in entgegengesetzte Richtungen bewegen, dann beschreibt der Sonnenkörper auf der Oberfläche des Epizykels einen Kreis, dessen Durchmesser der Differenz zwischen dem erdnächsten und dem erdfernsten Punkt der Sonnenbahn entspricht.

Ibn ash-Shatir entrümpelt die griechische Kosmologie

Beide Modelle konnten die scheinbare Bewegung der Sonne gleich gut beschreiben. Im Rahmen des klassischen Axioms der Einfachheit entschied sich Ptolemäus für das Exzentermodell, da es mit nur einer Sphäre auskam. Stillschweigend ging er aber darüber hinweg, dass beide Modelle Aristoteles' Kosmologie verletzten. Im Exzentermodell war die Erde nicht mehr das Zentrum der »Schwere« – ein klarer Verstoß gegen die Annahme von Aristoteles, die Erde sei das Zentrum des Kosmos. Andererseits nahm das Epizykelmodell eine Epizykelsphäre mit eigenem Schwerezentrum an, das sich nicht selbst bewegte, sondern durch die Bewegung des tragenden Deferenten bewegt wurde. Dies stand im Gegensatz zur Einfachheit des Äthers und schuf auch ein Schwerezentrum außerhalb der Erde.

Ptolemäus begründete diese Verletzung des aristotelischen Dogmas nicht, was die meisten Leser glauben ließ, sie sei nicht wirklich relevant. Ende des 12. Jahrhunderts griffen arabische Philosophen in Andalusien genau dieses Problem der ptolemäischen Astronomie auf. Die meisten der beobachtenden Astronomen der islamischen Welt störten sich indes nicht an den Inkonsistenzen – schließlich waren die Vorhersagen des ptolemäischen Modells recht präzise.

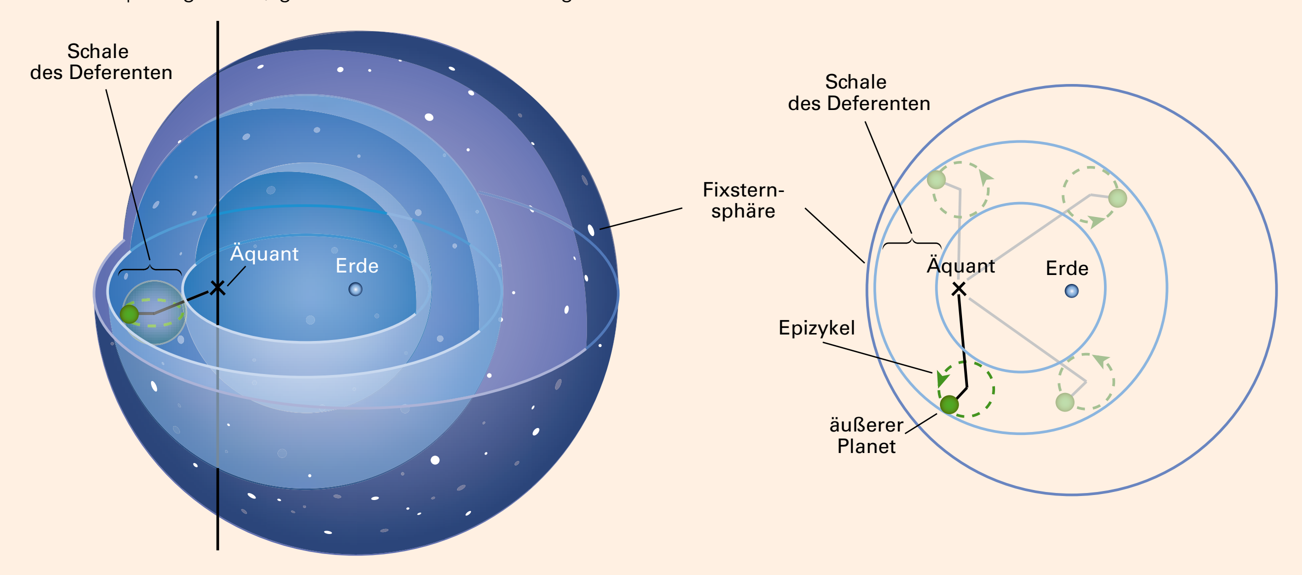
Erst im 14. Jahrhundert forderte Ibn ash-Shatir, das Exzentermodell wegen der Verletzung der aristotelischen Kosmologie aufzugeben. Er verbannte alle derartigen Modelle aus seiner eigenen geozentrischen Astronomie und ging dann sogar einen wesentlichen Schritt weiter, indem er die Natur des aristotelischen Äthers in Frage stellte. Wenn wirklich alles im Himmel aus Äther bestünde – die Himmelssphären, die Planeten und die Sterne –, wieso emittieren die Sterne dann Licht und die sie tragenden Sphären nicht?

Daraus schloss Ibn ash-Shatir, dass der Äther nicht so einfach sein konnte wie gemeinhin angenommen, sondern irgendeine Zusammensetzung *(tarkibun*

Äußere Planeten wie etwa der Mars scheinen am Himmel eine Schleifenbahn zu durchlaufen (gelbe Linie). Dieser Effekt kommt zu Stande, wenn die Erde auf ihrer engeren Bahn den äußeren Planeten quasi überholt.

»Schalenmodell« der Planetenbewegung

Ptolemäus' Modell für die Bewegung der äußeren Planeten enthielt eine Konstruktion, die den islamischen Astronomen des Mittelalters unsinnig erschien. Eine Trägersphäre, auch Deferent genannt, (hellblau) sollte sich um eine Achse bewegen, die durch das »Zentrum der Bewegungsausgleichung« (später Ausgleichspunkt oder Äquant genannt) geht und nicht durch den eigenen Mittelpunkt. Eine solche Bewegung ist physikalisch unmöglich. Das Problem löste erst im 13. Jahrhundert der islamische Astronom Mu'ayyad ad-Din al-Urdi. Kopernikus nutzte al-Urdis Theorem in seinem Modell der Planetenbewegung. Hier ist der Planet in eine Epizykelsphäre eingebettet, die innerhalb der Schalenstruktur des Deferenten läuft.



ma) haben müsse. Und wenn eine derartige Art der Zusammensetzung im himmlischen Bereich erlaubt werden könne, dann ließen sich auch die Epizykel tolerieren. Durch Einführen der Hilfskreise vermochte Ibn ash-Shatir rein geozentrische Modelle zu konstruieren, die sowohl mit dieser neuen Sicht der aristotelischen Kosmologie als auch mit Ptolemäus' Beobachtungen und denen nachfolgender Astronomen konsistent waren.

Merkwürdige Bahnen der Planeten

Erscheinen schon Ptolemäus' Modelle der Sonnenbewegung als seltsames Konstrukt, so trifft das auf seine Vorstellungen von den Bewegungen der Planeten umso mehr zu. Saturn, Jupiter, Mars und Venus verhalten sich am Firmament sehr merkwürdig: Sie ziehen von West nach Ost, doch manchmal verlangsamt sich ihre Bewegung, sie bleiben stehen, wandeln sogar in umgekehrter Richtung übers Himmelszelt, bis sie schließlich ihre ursprüngliche Wanderschaft wieder aufnehmen (siehe Abbildung links). Um diese eigentümlichen Bewegungen zu erklären, musste Ptolemäus das Prinzip der Einfachheit aufgeben und sowohl Epizykel als auch Exzenter einführen. (Seine Beschreibungen der Bewegungen von Mond und Merkur sind sogar noch komplizierter.)

In diesen kombinierten Modellen wies Ptolemäus jedem Planeten eine exzentrische Sphäre (den Deferenten) zu, die so dick war, dass sie in ihrem Innern einen festen Epizykel beherbergen konnte. Der Planet wiederum befand sich an der Oberfläche des Epizykels. Auch hier verschwieg Ptolemäus die Inkonsistenzen zur aristotelischen Vorstellung. Doch vom kosmologischen Standpunkt aus betrachtet war alles noch wesentlich schlimmer. Im Gegensatz zum ptolemäischen Sonnenmodell war die Bewegung des Epizykels nicht mehr an diejenige des Deferenten gekoppelt. Vielmehr sollte jetzt die Bewegung des Epizykels die Bahn eines Planeten erklären. Wegen ihrer Unabhängigkeit vom Deferenten konnte sie nicht länger über die Verletzung durch die Exzentrizität hinwegtäuschen.

Vielleicht der verstörendste Aspekt dieses Modells war der Umstand, dass sich die Deferenten der Planeten nicht mehr um ihre eigenen Mittelpunkte bewegten. Stattdessen sollten sie sich Ptolemäus zufolge gleichförmig um eine Achse durch einen rein mathematisch definierten Punkt – den so genannten Ausgleichspunkt oder Äquanten – bewegen. Die Vorstellung eines solchen ausgezeichneten Punkts außerhalb der Erde (Bild oben) erschien einigen arabischen Astronomen denn doch zu unsinnig.

Viele nahmen sich dieses Problems an, doch ohne Erfolg. Erst im 13. Jahrhundert fand ein damaszenischer Astronom namens Mu'ayyad ad-Din al-Urdi eine Lösung. Sein Theorem, heute das Urdi-Lemma genannt, konnte die scheinbaren Bewegungen der Planeten durch einen Deferenten darstellen, der sich gleichförmig um eine Achse in seinem Zentrum bewegt. Ein Vierteljahrtausend später nutzte Kopernikus dieses Theorem, um die Planetenbewegungen in seinem heliozentrischen Weltbild zu erklären.

In gewisser Weise konnte Ptolemäus' Modell die Umlaufbewegungen der Planeten in »Länge« am Himmel erklären, aber ihre Bewegung in der zweiten Koordinate, in der »Breite«, erforderte einen anderen Ansatz. Für die Venus zum Beispiel nahm Ptolemäus an, dass die »Äquatorebene« des Deferenten auf- und abschwinge, also eine Schaukelbewegung ausführe. Der von ihm vorgeschlagene Mechanismus bestand aus zwei kleinen Kreisen senkrecht zur Äquatorebene, die auf deren Umfang lagen. Der Durch- ▷

▷ messer dieser Kreise entspräche der Differenz in der Breitenbewegung des Planeten. Wenn sich die Äquatorebene entlang der Kreise bewegt, vollführt sie die gewünschte Schaukelbewegung.

Dieser Mechanismus hat nur einen Nachteil: Er funktioniert nicht. Denn wenn die Kante der Äquatorebene des Deferenten mit den kleinen Kreisen verbunden ist, würde eine Schwankung entstehen, welche die longitudinale Umlaufbewegung zerstörte (die ansonsten korrekt wiedergegeben würde).

Und selbstverständlich könnte ein solches Konstrukt nie mit der Kosmologie des Aristoteles in Einklang gebracht werden, die alle himmlischen Bewegungen als gleichmäßig und kreisförmig ansah. Nichts am Himmel durfte wackeln. In den Worten des Astronomen Nasir ad-Din at-Tusi (1201–1274): »Derartiges Gerede hat nichts mit der Kunst der Astronomie zu tun« – eine höfliche Umschreibung für kompletten Unsinn.

Ptolemäus selbst scheint sich dieses Urteils sogar schon bewusst gewesen zu sein. Zu seiner eigenen Verteidigung nahm er Zuflucht zu der Schwäche der Sterblichen, die sich anmaßen, die Weisheit Gottes verstehen zu wollen: »Nun lasst keinen, der den komplizierten Aufbau unserer Konstruktionen betrachtet, solche Hypothesen als überkünstelt beurteilen. Denn es ist weder angemessen, menschliche [Werke] mit göttlichen zu vergleichen, noch sich seine Meinung über solch große Dinge anhand von schiefen Vergleichen zu bilden …«

Erfindung des Planetengetriebes

Letztlich war es at-Tusi, der eine Erklärung für die Breitenbewegung der Wandelsterne fand. Sein brillanter Entwurf bestand aus zwei Sphären, von denen die eine genau halb so groß war wie die andere und sich von innen an die größere schmiegte (Kasten auf der rechten Seite).

At-Tusis Mechanismus konnte aus einer gleichförmigen Kreisbewegung heraus eine lineare Bewegung erzeugen und überwand so die lange gültige aristotelische Unterscheidung zwischen geradlinig-radialen Bewegungen im irdischen Bereich und gleichförmig-kreisförmigen Bewegungen in der himmlischen Zone.

Dieser Mechanismus, inzwischen Tusi-Paar genannt, hat vielfältige Anwendungen – zum Beispiel das Übersetzen der geradlinigen Bewegung eines Kolbens in die Kreisbewegung eines Rades. Im Planetengetriebe – einer speziellen Getriebeform mit Sonnenrad, Planetenrädern und Hohlrad mit Innenverzahnung – ist der ursprünglich astronomische Mechanismus technisch wie namentlich überliefert. Und auch Kopernikus nutzte at-Tusis Konstrukt, um in seinem heliozentrischen Weltbild die Planetenbewegungen zu erklären (Kasten auf dieser Seite).

Um die Grundlagen der modernen Astronomie richtig einzuschätzen, ist es wichtig, die Unterschiede zwischen griechischer und arabischer Sternkunde zu verstehen. Der Übergang von der griechischen Astronomie zu derjenigen der europäischen Renaissance wäre ohne die intellektuellen Beiträge der islamischen Astronomen im Mittelalter ziemlich anders verlaufen. Die Unstimmigkeiten in den ptolemäischen Werken waren einfach zu tief gehend, und es brauchte mehrere Generationen arabischer Gelehrter, sie angemessen zu formulieren und dann zu lösen.

Das größte Problem war die mathematische Sprache, die Ptolemäus zur Beschreibung der Planetenbewegungen benutzte. Denn sie entzog dem aristotelischen geozentrischen Weltbild die physikalische Grundlage. Hätten nur die fehlerhaften Beobachtungen oder falschen Methoden das Problem verursacht, so wäre es nicht kritisch gewesen. Aber indem er Aristoteles' Kosmologie mit einer mathematischen Beschreibung verband, die ihr die grundlegenden Eigenschaften nahm, schuf Ptolemäus eine fiktive Welt, die dem gesunden Menschenverstand widersprach. So definierte zwar der Äquant eine Sphäre, aber ohne ihr die Eigenschaften einer solchen zuzuschreiben. Derartige Inkonsistenzen bildeten das eigentliche Problem der griechischen Astronomie, und sie erforderten einen völlig neuen Ansatz.

Auch Kopernikus plagte sich in seinen frühen Werken mit den mathematischen Widersprüchlichkeiten des Ptolemäus. Das Problem des Äquanten störte ihn mehr als das geozentrische Weltbild. Auch der Übergang zu einem heliozentrischen Universum löste das Problem des Äquanten keineswegs, denn Kopernikus setzte noch immer kreisförmige Himmelsbewegungen voraus, und so benötigte er nach wie vor einen Äquanten, um die in Wahrheit elliptischen Bahnen zu beschreiben. (Lediglich die Epizykel entfielen, wenn die Erde nicht mehr im Mittelpunkt des Kosmos stand, sondern um die Sonne kreiste.) Eine genaue Analyse

Was wusste Kopernikus von den Arabern?

Kopernikus' Beweis des Tusi-Paares (links) war mit dem von at-Tusi selbst (rechts) identisch – einschließlich der alphabetischen Bezeichnungen der Punkte im Diagramm. Auch die Art, in der Kopernikus das Tusi-Paar zur Erklärung der Merkurbewegung heranzog, war identisch mit der, die Ibn ash-Shatir gebrauchte. Woher kannte Kopernikus die Werke der islamischen Gelehrten? Diese Frage beschäftigt die Wissenschaftshistoriker noch immer. Jedenfalls muss es Verbindungen zwischen den astronomischen Traditionen der antiken Griechen, den mittelalterlichen Arabern und dem Europa der Renaissance gegeben haben.



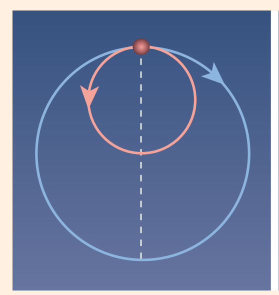
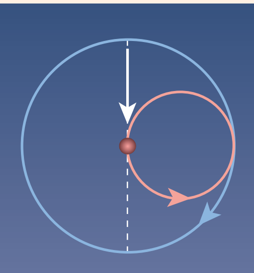
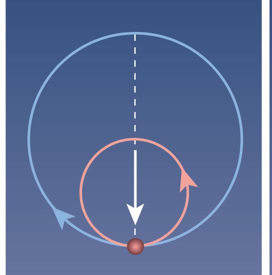
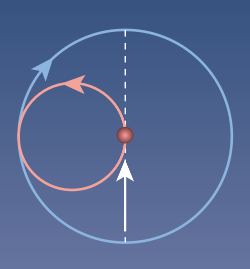
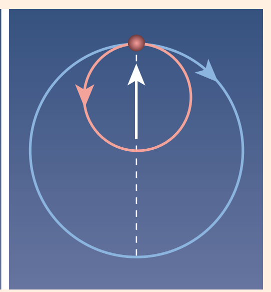
MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON GEORGE SALIBA / AMERICAN PHILOSOPHICAL SOCIETY



MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON GEORGE SALIBA / VATIKANISCHE BIBLIOTHEK

Wie aus kreisförmigen Bewegungen eine geradlinige wird

Ein so genanntes Tusi-Paar kann aus gleichförmigen Kreisbewegungen (roter und blauer Kreis) eine lineare Bewegung (weiße gestrichelte Linie) erzeugen. Dies löste einige der Probleme, vor denen die antiken Astronomen standen. Hier trägt der blaue Kreis den roten im Uhrzeigersinn, während dieser in die entgegengesetzte Richtung rotiert. Die beiden Kreisbewegungen haben eine lineare Bewegung eines Objekts (rote Kugel) zur Folge. Mit diesem von dem Astronomen Nasir ad-Din at-Tusi im 13. Jahrhundert entwickelten Mechanismus ließ sich die Breitenbewegung der Planeten erklären.

von Kopernikus' Werk zeigt, dass er nur zwei Theoreme benutzte, die nicht bereits in den klassischen Quellen vorhanden waren: das Urdi-Lemma und das Tusi-Paar. Mit ihrer Hilfe löste er im 16. Jahrhundert genau die Probleme, mit denen sich die arabischen Astronomen im 13. Jahrhundert herumgeschlagen hatten.

Es gibt weitere Gemeinsamkeiten in den Werken von Kopernikus und denen der mittelalterlichen arabischen Astronomie. Die Konstruktion, mit der Kopernikus die Bewegung des Monds um die Erde beschrieb, ist – Vektor für Vektor – identisch mit derjenigen, die Ibn ash-Shatir mehr als zwei Jahrhunderte früher vorgeschlagen hatte. Und Kopernikus' Modell für die Bewegung des Merkurs führte das Tusi-Paar in einer Weise ein, die in Anordnung und Funktion dem Merkurmodell von Ibn ash-Shatir entsprach.

Kopernikus las Griechisch

Also müssen wir uns fragen: Wie konnte jemand wie Kopernikus von diesen Ideen erfahren haben? Nach allem, was wir wissen, konnte Kopernikus kein Arabisch, und Ibn ash-Shatirs Werke wurden nie ins Lateinische übersetzt.

Es gibt interessante Hinweise. Eine Möglichkeit zeigte der Mathematikhistoriker Otto Neugebauer auf, als er die Aufmerksamkeit auf ein byzantinisches Manuskript in griechischer Sprache lenkte, das aus dem Arabischen übersetzt war und einige der Ergebnisse islamischer Astronomen enthielt. Wir wissen, dass Kopernikus Griechisch las, und er konnte diese Handschrift eingesehen haben, als er Anfang des 16. Jahrhunderts in Italien studierte (wo das Manuskript aufbewahrt wird).

Vor einiger Zeit habe ich eine weitere Möglichkeit diskutiert. Auf meinen Reisen zu verschiedenen europäischen Bibliotheken habe ich einige arabische Manuskripte über planetare Astronomie ausfindig gemacht – einschließlich einer Kopie der Kritik at-Tusis an Ptolemäus. Diese Handschriften scheinen Kopernikus' Zeitgenossen gehört zu haben, die sehr gut Arabisch konnten, wie die vielen lateinischen Anmerkungen an den Seitenrändern belegen. Haben diese Zeitgenossen oder Kollegen dieses Wissen vielleicht an Kopernikus weitergegeben? Noel Swerdlow von der Universität Chicago und Neugebauer meinten sogar, in Italien sei um 1500 der Inhalt vieler arabischer Werke allgemein bekannt gewesen.

Doch andere Fragen bleiben offen. Warum sollten arabische Astronomen, die so sehr versuchten, die ptolemäische Astronomie zu überarbeiten, an der aristotelischen Kosmologie festhalten? Warum sollte Kopernikus die Arbeit auf sich nehmen, die aristotelische Kosmologie mathematisch zu untermauern und dann alles wegzuwerfen, indem er die Sonne in das Zentrum des Planetensystems schiebt? Er konnte ja nicht ahnen, dass so etwas wie die von Newton entwickelte Gravitationstheorie kommen würde – die schließlich erklärte, wie das Universum zusammengehalten wird. Auf Grund dessen, was er zum damaligen Zeitpunkt wusste, können wir Kopernikus sogar vorwerfen, er hätte sich wie Ptolemäus verhalten: einfach eine mathematische Zweckmäßigkeit akzeptieren, ohne sie kosmologisch untermauern zu können. Die arabischen Astronomen blieben wenigstens konsistent.

Jedenfalls verlangt all dies nach einer Verfeinerung unserer Analyse, wenn wir aufschlüsseln wollen, was arabisch in der Wissenschaft der europäischen Renaissance war und was griechisch in der arabischen Wissenschaft. Wenn wirklich solch enge Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Traditionen bestanden, so wird es fast sinnlos, von einer griechischen, arabischen oder europäischen Wissenschaft zu sprechen, so als hätte jede ihren eigenen Charakter. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



George Saliba ist Professor für Arabistik und Islamistik an der Columbia-Universität in New York. Er erforscht die Geschichte der arabischen Wissenschaft, insbesondere die Entwicklung der Planetentheorien und deren Übergang in das Europa im Zeitalter der Renaissance.

Nikolaus Kopernikus. Der Begründer des modernen Weltbilds. Von William Shea. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 2003

Der Almagest. Die Syntaxis Mathematica des Claudius Ptolemäus in arabisch-lateinischer Überlieferung. Von Paul Kunitzsch. Harrassowitz-Verlag, 1974

A history of arabic astronomy: planetary theories during the golden age of islam. Von George Saliba. New York University Press, 1994

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TRUMPF MEDIZINSYSTEME

Licht gegen Tumoren

Mit der »laserinduzierten interstitiellen Thermotherapie« LITT lassen sich Metastasen und Tumore patientenschonend bekämpfen.

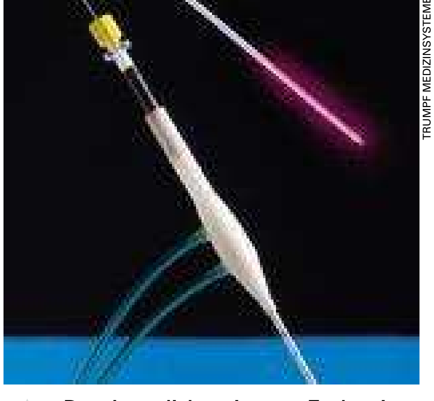
Von Bernhard Gerl

Alljährlich erkranken etwa 50 00 bis 60 000 Menschen in Deutschland an Darmkrebs (fachlich: kolorektales Karzinom) – der zweithäufigsten Krebsart weltweit. Chirurgen können den Tumor in der Regel gut und vollständig entfernen. Wurde die Krankheit frühzeitig genug erkannt, ist der Patient damit geheilt. Allerdings haben sich in rund 60 Prozent aller Fälle schon Metastasen gebildet, meist in der Leber. Auch Karzinome anderer Organe streuen bösartige Zellen in dieses Organ. Wieder greifen die Ärzte zum Skalpell und schneiden das befallene Gewebe möglichst vollständig heraus, sonst könnten sich Sekundärmetastasen bilden. Leider ist dieser Eingriff nur bei 10 bis 25 Prozent der Neuerkrankten überhaupt möglich; oft gibt es schon zu viele Tumorherde oder sie liegen zu ungünstig. Viele Patienten sind auch schon zu alt für die sehr belastende Operation – Darmkrebs trifft vor allem die über 65-Jährigen.

Eine neue, schonende Alternative ist die laserinduzierte interstitielle Thermotherapie (LITT). Sie wurde von Trumpf Medizinsysteme in Zusammenarbeit mit dem Berliner Unternehmen Lasermedizin-Technologie, Ärzten und Universitätskliniken entwickelt.

Die Ärzte suchen zuerst die genaue Position des Krebsgeschwürs, dann schieben sie – unter lokaler Betäubung des Patienten – eine dünne Hohlnadel (Katheter) bis in das Zentrum des Tumors vor. Darüber führen sie eine flexible Glasfaser ein, infrarotes Laserlicht mit 1064 Nanometer Wellenlänge wird eingespeist. Das Ende der Faser ist so bearbeitet, dass sie diese Strahlung gleichmäßig in alle Richtungen abgibt. Umliegendes Gewebe erwärmt sich auf bis zu hundert Grad Celsius. Da Krebszellen einen schnelleren Stoffwechsel als gesunde Zellen haben, reagieren sie darauf besonders empfindlich. Ab achtzig Grad Celsius wird das Kollagen in den Tumorzellen zerstört, und sie trocknen aus. Der Körper baut die toten Zellen ab. Damit das Gewebe nicht verkohlt – was die Ausbreitung des IR-Lichts und die Wärmeleitung verringern würde –, wird es während der Behandlung über den Katheter mit Kochsalzlösung gekühlt.

Die Behandlung dauert je nach Tumorgröße zwischen 15 und 30 Minuten. Für ein Gewebevolumen von 1,5 bis 2,0 Zentimeter Durchmesser sind etwa 45 Kilojoule erforderlich (der homogene Aufbau der Leber rechtfertigt die vereinfachende Annahme eines kugelförmigen Behandlungsvolumens). Eine Laserfaser liefert maximal 25 bis 30 Watt. Pro Eingriff arbeiten die Ärzte mit bis zu vier solcher Fasern. Sind die Krebsgeschwüre größer als fünf bis sieben Zentimeter im Durchmesser, trägt oft eine vorhergehende Chemotherapie zum späteren Therapieerfolg bei. In jedem Fall wählen die Ärzte den zu behandelnden Bereich zur Sicherheit etwa zehn Millimeter größer, als die Metastase vermessen wurde.



TRUMPF MEDIZINSYSTEME

Das Laserlicht tritt am Ende einer Faser aus und gibt Energie an das umgebende Gewebe ab. Eine Flüssigkeitskühlung sorgt dafür, dass das Gewebe nicht verkohlt. Siehe auch Grafik unten.



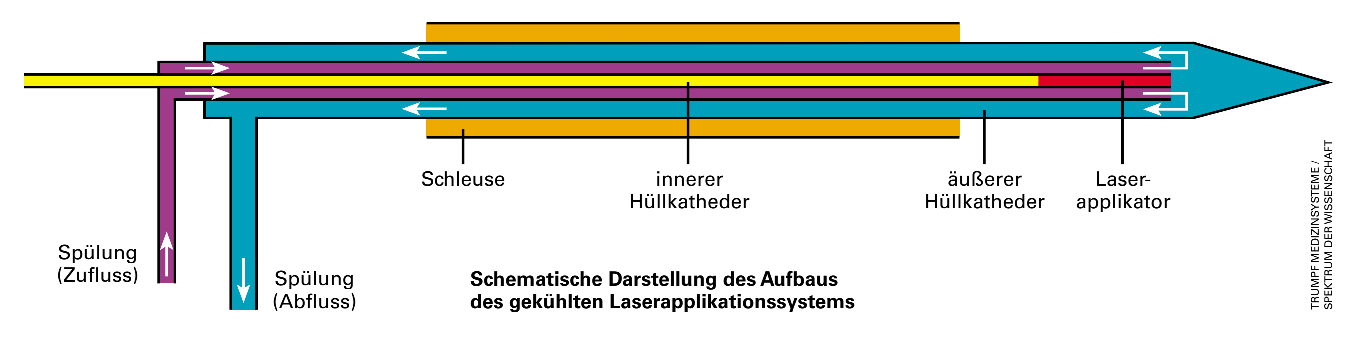
TRUMPF MEDIZINSYSTEME

Eine Lichtleitfaser, über eine Kanüle minimalinvasiv eingeführt, kann die Behandlung von Lebermetastasen verbessern.

Kontrolle durch Kernspin

Mitunter ist jedoch ein minimalinvasiver Eingriff nicht möglich: Etwa bei Verwachsungen durch Voroperation, wenn die Metastasen bereits sehr groß sind oder ungünstig liegen. Dann können die Ärzte die LITT auch bei einer offenen Operation in Vollnarkose einsetzen.

Den entscheidenden technischen Vorteil der LITT sieht der Radiologe Thomas Vogl von der Frankfurter Universitätsklinik darin, dass die komplette Lasertherapie im Magnetresonanztomo-



TRUMPF MEDIZINSYSTEME / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Schematische Darstellung des Aufbaus des gekühlten Laserapplikationssystems

Laseranwendungen in der Medizin

Aus vielen Bereichen der Medizin ist der Laser nicht mehr wegzudenken. Dabei bestimmt die Wellenlänge des Lichts die Anwendung und seine Leistungsdichte die Wirkung auf das Gewebe. Vereinfacht teilt man diese Lasertechnik in fotochemische und thermische Prozesse sowie nichtlineare Wechselwirkungen.

Für die Diagnose von Krankheiten verwenden die Ärzte Laser mit langen Expositionszeiten und niedrigen Leistungsdichten, sodass – im Gegensatz zum Röntgen – eine Schädigung des Gewebes ausgeschlossen ist. Gemessen werden Fluoreszenz- oder Streulicht.

Ein Beispiel: Bei Verdacht auf eine Nasennebenhöhlenentzündung führt der Arzt den Infrarot-Laserstrahl über einen Lichtwellenleiter in die Kiefernhöhle ein und misst das Streulicht, das unterhalb des Auges austritt, denn es wird bei einer Entzündung in den Nebenhöhlen von Flüssigkeit stärker absorbiert.

Um thermische Prozesse durch den Laserstrahl auszulösen, verwendet man mittlere Expositionszeiten und Leistungsdichten.

Die nichtlineare Wirkung des Laserstrahls wird durch hohe Leistungsdichten (über 107 Watt pro Quadratzentimeter) und Expositionszeiten im Nanosekundenbereich erreicht. Eine sehr erfolgreiche Anwendung ist die Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK), bei der Hornhautschichten im Auge abgetragen werden, um Fehlsichtigkeit zu beheben (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2003, S. 84).

Neben diesen Beispielen setzt sich die Behandlung mit dem Laser auch in anderen Gebieten durch: Chirurgen öffnen verschlossene Gefäße oder bohren Löcher in den Herzmuskel, um eine bessere Sauerstoffversorgung zu bewirken, Schönheitschirurgen beseitigen damit Haare, Narben oder Falten.

grafen (MRT) überwacht werden kann. Denn er visualisiert die Auslenkung molekularer Achsen durch Magnetfelder und dieses Signal ändert sich unter anderem mit der Temperatur. Der Therapeut sieht also unmittelbar, ob die Metastase einschließlich des Sicherheitssaums verödet wird. Greift die Erwärmung auf gesundes Lebergewebe über, kann er die Behandlung stoppen. Das ist insbesondere für Patienten mit schon vorgeschädigter Leber überlebenswichtig.

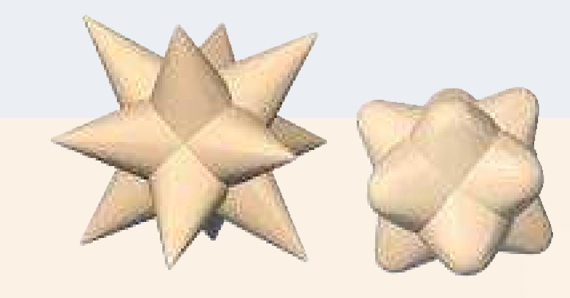
Thomas Vogl und sein Team des Instituts für diagnostische und interventionelle Radiologie therapierten in den vergangenen zehn Jahren mit diesen Techniken rund 4000 Lebertumore bei etwa 1500 Patienten erfolgreich. Ihre Auswertungen und die anderer medizinischer Zentren in Deutschland zeigten, dass sich Metastasen mit der LITT genauso zuverlässig zerstören lassen wie mit konventionellen Operationen, aber ohne die Belastungen durch Vollnarkose, Blutverlust und Schnitte. Zudem setzen offene chirurgische Eingriffe in etwa dreißig Prozent der Fälle Krebszellen im Körper frei. Der Tumor befällt dann ein anderes Organ und breitet sich so erst recht aus. Bei der minimalinvasiv angewandten LITT konnte eine derartige Verschleppung noch nicht beobachtet werden. Der Grund ist vermutlich, dass die Hitze an der Katheterspitze alle Zellen abtötet.

Starke Nachfrage stoppt Studie

Nicht nur bei Metastasen in der Leber, auch bei Lungen- und Hirntumoren wird das Verfahren inzwischen erfolgreich eingesetzt. Derzeit erproben die Trumpf-Laserspezialisten im Rahmen klinischer Forschungen weitere potenzielle Anwendungsfelder. Erfolg erhoffen sie sich auch bei der Behandlung von Tumoren in Brust, Gebärmutter, Bauchspeicheldrüse und Knochen. Leider sind diese Organe problematischer, denn sie werden von großen Blutgefäßen durchzogen, die Wärme schnell vom Katheter abtransportieren.

Auf Grund der positiven Ergebnisse an verschiedenen deutschen Kliniken hatte das Bundesforschungsministerium eine Studie zur LITT bei Lebermetastasen des kolorektalen Karzinoms gefördert. Doch die Studie musste abgebrochen werden: Die Mehrzahl der Patienten bestand auf der Behandlung mit dem Laser, eine ausreichend große Vergleichsgruppe mit herkömmlicher chirurgischer Therapie kam nicht zu Stande. ◁

Der Physiker **Bernhard Gerl** arbeitet als Wissenschafts- und Technikautor in Regensburg.



Die Lösung eines Jahrhundertproblems

Allem Anschein nach hat der russische Mathematiker Grigori Perelman die berühmte Poincaré'sche Vermutung bewiesen. Damit finden hundert Jahre vergeblichen Bemühens ein glückliches Ende.

Von Graham P. Collins

Stellen Sie sich einen Formationstanz vor: Ein Schritt vor, ein Schritt zurück, einer nach rechts, einer nach links, in die Knie gehn, ein Luftsprung – und das war's schon. In den Einzelheiten mag es die größten Unterschiede geben, aber im Prinzip gibt es nur drei verschiedene Raumrichtungen, in die sich ein Tänzer – oder irgendein materieller Gegenstand – bewegen kann. Genau das ist es, was die Mathematiker eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit oder kurz 3-Mannigfaltigkeit nennen: Von innerhalb gesehen, gibt es in jedem Punkt der Mannigfaltigkeit drei zueinander senkrechte Richtungen, in die man sich fortbewegen kann – zumindest ein kurzes Stück.

Anders ausgedrückt: Die Umgebung jedes Punkts ist durch drei Koordinaten beschreibbar. So kann man in der Nähe der Erdoberfläche jeden Punkt durch drei Zahlen beschreiben: geografische Länge, geografische Breite und Höhe über dem Meeresspiegel. Offensichtlich ist der uns umgebende Raum eine 3-Mannigfaltigkeit. (Auf die Spekulationen der Stringtheoretiker, nach denen die Welt »in Wirklichkeit« zehn oder elf Dimensionen habe – vergleiche Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24, und 4/1998, S. 62 –, kommt es in unserem Zusammenhang nicht an.)

Die 3-Mannigfaltigkeit, in der wir leben, erstreckt sich nicht nur über eine kurze Strecke, sondern über Milliarden von Lichtjahren. Ist sie wirklich der unendlich ausgedehnte Raum, den die Theoretiker »euklidisch« nennen, weil er schon den alten Griechen im Prinzip geläufig war? Die Physiker versuchen den uns umgebenden Raum durch mathematische Modelle zu beschreiben.

Innerhalb der durch Newton begründeten klassischen Mechanik oder in der traditionellen Quantenmechanik ist er ein für alle Mal gegeben. Er ist gewissermaßen eine Bühne, auf der sich die Physik abspielt. In Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie dagegen gehört der Raum zu den Mitspielern. So hängt der Abstand zwischen zwei Punkten davon ab, wie viel Energie und Materie sich in der Nähe dieser zwei Punkte befindet. Auch in diesem Fall wird der Raum durch eine 3-Mannigfaltigkeit beschrieben. Was wir über diese Objekte sagen können, betrifft daher unmittelbar unser Verständnis von den Grundlagen der Physik.

Da Raum und Zeit in der Relativitätstheorie eng miteinander verknüpft sind, ist auch die vierdimensionale Mannigfaltigkeit, die der Raumzeit entspricht, von physikalischer Bedeutung. Allgemein haben die Mathematiker keine Scheu, mit

IN KÜRZE

- **Seit 100 Jahren** versuchen Mathematiker, eine Vermutung von Henri Poincaré zu beweisen. Sie besagt, dass ein spezielles geometrisches Objekt, die so genannte dreidimensionale Sphäre (3-Sphäre), durch eine besondere Eigenschaft unter allen dreidimensionalen Objekten ausgezeichnet ist.
- Nun scheint **der russische Mathematiker Grigori Perelman** Poincarés Vermutung bewiesen zu haben. Darüber hinaus bringt er mit seinen neuen Arbeiten ein groß angelegtes Forschungsprogramm zur Klassifikation der 3-Mannigfaltigkeiten zum Abschluss.
- **Unser Universum ist durch eine 3-Mannigfaltigkeit gegeben.** Insofern hat Perelmans Arbeit auch eine vergleichsweise konkrete Bedeutung. Unabhängig davon hat sein Lösungsansatz Bezüge zu verschiedenen Aspekten der theoretischen Physik, insbesondere zu Einsteins Theorie der Gravitation.

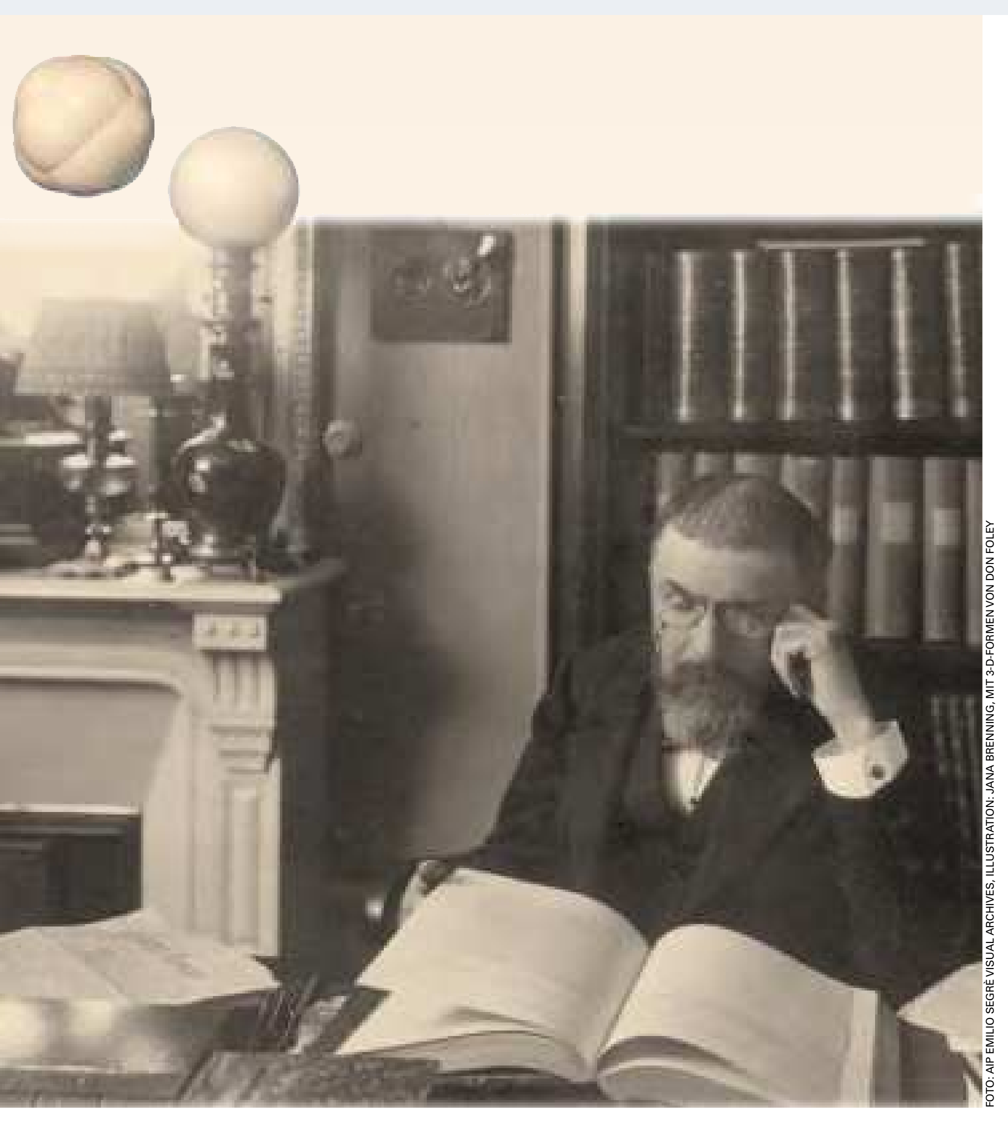


FOTO: AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES, ILLUSTRATION: JANA BRENNING, MIT 3-D-FORMEN VON DON FOLEY

◀ **Henri Poincaré vermutete 1904, dass jedes dreidimensionale Gebilde, das sich in einigen wesentlichen Aspekten wie eine 3-Sphäre verhält, schon die 3-Sphäre ist. Es dauerte 99 Jahre, bis die Mathematiker diese Vermutung beweisen konnten. (Aber Achtung: Eine 3-Sphäre ist nicht das, was Sie sich wahrscheinlich gerade darunter vorstellen!)**

n-Mannigfaltigkeiten beliebiger Dimension *n* umzugehen. Aber ausgerechnet der Fall $n = 3$, der uns aus dem Alltag geläufig ist, stellt sich als der schwierigste heraus.

Der Zweig der Mathematik, der sich mit den globalen Eigenschaften von Mannigfaltigkeiten beschäftigt, ist die Topologie. Typische Fragestellungen sind: Welches ist der einfachste Typ von 3-Mannigfaltigkeiten? Kann man ihn durch topologische Eigenschaften beschreiben oder sogar eindeutig bestimmen? Welche Arten von 3-Mannigfaltigkeiten gibt es überhaupt?

Wohlgemerkt: Den Topologen geht es hier um kompakte Mannigfaltigkeiten ohne Rand; das heißt, der Abstand zweier Punkte kann nicht beliebig groß werden, und man stößt beim Wandern in der Mannigfaltigkeit nirgends an eine Grenze. Damit ist die einfachste denkbare 3-Mannigfaltigkeit, der dreidimensionale euklidische Raum, bereits außer Diskussion, denn er ist unendlich ausgedehnt.

Die einfachste kompakte 3-Mannigfaltigkeit ist die so genannte 3-Sphäre. Das ist schon lange bekannt. Die beiden anderen Fragen stehen jedoch schon über ein Jahrhundert lang unbeantwortet im Raum. Nun hat höchstwahrscheinlich Grigori (»Grisha«) Perelman, ein russischer Mathematiker aus St. Petersburg, diese Fragen erledigt und damit auch die berühmte Poincaré-Vermutung bewiesen.

Poincaré und die 3-Sphäre

Henri Poincaré (1854–1912), einer der größten Mathematiker seiner Zeit, hatte vermutet, dass die 3-Sphäre unter den 3-Mannigfaltigkeiten eindeutig ist: Jede 3-Mannigfaltigkeit, die über gewisse topologische Eigenschaften der 3-Sphäre verfügt, kann zu einer 3-Sphäre zurechtgebogen werden und ist ihr damit, topologisch gesehen, bereits gleich.

Wenn Perelmans Beweis der Überprüfung standhält, beantwortet er die dritte Frage gleich mit, indem er eine vollständige Klassifizierung aller 3-Mannigfaltigkeiten liefert. Das ist der Inhalt der Geometrisierungsvermutung, einer Verallgemeinerung der Poincaré'schen Vermutung, die William P. Thurston von der Universität von Kalifornien in Davis (heute an der Cornell-Universität) in den 1970er Jahren aufgestellt hat.

Was ist nun eine 3-Sphäre? Wer sich darunter etwas Kugelförmiges, zugleich aber Hauchdünnes und Ungreifbares vorstellt, liegt schon ungefähr richtig. Aber man muss noch ein wenig geistige Gymnastik treiben (Kasten S. 90/91). Der Rand einer dreidimensionalen Kugel heißt nicht 3-Sphäre, sondern 2-Sphäre, denn er ist eine 2-Mannigfaltigkeit: Bereits zwei Zahlen, zum Beispiel Breitengrad und Längengrad, reichen aus, um eine Position auf ihr festzulegen.

Ein Käfer, der auf einem Luftballon, oder ein Mensch, der auf der Erdoberfläche herumkriecht, hält seine Welt zunächst für flach: Auf kurze Entfernungen ist die 2-Sphäre nicht von der zweidimensionalen euklidischen Ebene zu unterscheiden, wie es sich für eine Mannigfaltigkeit gehört. Erst wenn der Käfer lange genug geradeaus läuft, macht sich die Krümmung bemerkbar, und die Illusion der Ebene bricht zusammen: wenn er an seinem Ausgangspunkt wieder eintrifft.

Entsprechend würde eine Mücke in der 3-Sphäre zunächst annehmen, sie sei in einem gewöhnlichen dreidimensionalen Raum. Flöge sie aber immer weiter in eine feste Richtung, so würde auch sie wieder an der Stelle ankommen, an der sie losgeflogen ist.

Sphären gibt es in jeder Dimension. Die 1-Sphäre ist jedem geläufig: Sie entspricht dem Rand eines zweidimensionalen Vollkreises. Je größer die Dimension *n* wird, desto schwerer ist es, sich eine *n*-Sphäre vorzustellen.

Nachdem Henri Poincaré seine Vermutung gegen Anfang des 20. Jahrhunderts aufgestellt hatte, vergingen unge- ▷


CELENE CHANG, DAILY PRINCETONIAN

◀ **Grigori Perelman spricht an der Universität Princeton im April 2003 über seinen Beweis der Poincaré'schen Vermutung und von Thurstons Geometrisierungsvermutung.**

▷ fähr 50 Jahre, bis ein erster wesentlicher Fortschritt erzielt wurde. In den 1960er Jahren bewiesen die Mathematiker eine analoge Vermutung für Sphären der Dimension 5 und größer. Erstaunlicherweise war es einfacher, sich in den »höheren Sphären« zurechtzufinden, als in den »anschaulicheren« niedrig-dimensionalen. Der Fall $n = 4$ erwies sich als unerwartet schwierig und wurde erst 1982 erledigt. Damit blieb nur noch die ursprüngliche Vermutung Poincarés ungeklärt (die Fälle $n = 1$ und $n = 2$ sind unproblematisch).

Erst 2002 gab es einen wesentlichen Schritt vorwärts. In diesem Jahr legte Grigori Perelman einen ersten Artikel zu diesem Thema auf den Preprintserver www.arxiv.org, auf dem Mathematiker und Physiker ihre noch nicht begutachteten wissenschaftlichen Arbeiten zu veröffentlichen pflegen. Perelman erwähnte zwar in professionellem Understatement mit keinem Wort, dass seine Arbeit auf einen Beweis der Poincaré-Vermutung hinauslief; aber das war für einen Topologen ohne weiteres erkennbar.

Im März 2003 legte Perelman einen zweiten Artikel nach, im April und Mai kam er in die USA, um seine Ideen einer breiteren Öffentlichkeit vorzustellen. Er hielt Vortragsreihen am Masachusetts Institute of Technology und an der Universität des Staates New York in Stony Brook; allein dort sprach er zwei Wochen lang täglich drei bis sechs Stunden.

Einer seiner kompetentesten Zuhörer, der Topologe und Differenzialgeometer Michael Anderson aus Stony Brook, kommentierte: »Jede der aufkommenden Fragen konnte er ohne weiteres beantworten. Seine Antworten waren immer sehr klar und sind bisher nicht ernsthaft in Frage gestellt worden. Ein kleinerer Teil der ganzen Arbeit muss noch überprüft werden, aber niemand glaubt, dass der Beweis an diesem letzten Stück scheitern wird.« Der erste Artikel enthält die wesentlichen Ideen und gilt inzwischen als gründlich überprüft; mit der zweiten Arbeit, die einige Anwendungen und kompliziertere Argumentationen enthält, sind die Mathematiker noch nicht soweit.

Für den Beweis der Poincaré-Vermutung hat das Clay Institute of Mathematics, eine private Stiftung zur Förderung der Mathematik, im Jahre 2000 ein Preisgeld von einer Million US-Dollar ausgesetzt: Die Vermutung ist eines der »Millennium-Probleme« (Spektrum der Wissenschaft, Spezial 4/2003: Omega, S. 40). Nach den Ausschreibungsbedingungen des Clay Institute muss der Beweis veröffentlicht werden und danach mindestens zwei Jahre lang jeder Kritik standhalten. Eigentlich ist unter »veröffentlicht« der Abdruck in einer anerkannten Fachzeitschrift gemeint – was für Perelmans Arbeiten nicht zutrifft. Aber jede klassische Begutachtung könnte nicht besser sein als die zurzeit stattfindende Überprüfung der Ergebnisse.

Perelmans Arbeit führt ein Forschungsprogramm weiter, das Richard S. Hamilton von der Columbia-Universität in New York in den 1990er Jahren entwickelt hat. Hamiltons Arbeiten wurden Ende 2003 vom Clay Institute durch einen Forschungspreis ausgezeichnet. Perelmans Analyse räumte gewisse Hindernisse aus dem Weg, an denen Hamilton noch gescheitert war.

Sollte sich Perelmans Argumentation als hieb- und stichfest erweisen (wovon alle ausgehen), so beweist er damit nicht nur die Poincaré-Vermutung, sondern auch die schon erwähnte Geometrisierungsvermutung von Thurston. Hätte sich die Poincaré-Vermutung als falsch erwiesen, so wäre auch die Klassifikation der 3-Mannigfaltigkeiten insgesamt weitaus komplizierter und unübersichtlicher ausgefallen. Die Geometrisierungsvermutung verschafft uns dagegen ein klares und einleuchtendes Gesamtbild.

Die seltsame Welt der Topologie

Poincarés Vermutung und Perelmans Beweis beziehen sich auf Gegenstände, auf deren genaue Form es nicht ankommt. Man darf sich vorstellen, sie seien aus Knete, die man nach Belieben strecken, verbiegen oder zusammendrücken kann, solange man sie nicht zerschneidet oder zwei getrennte Stücke zusammenfügt. Der zugehörige Zweig der Mathematik ist die Topologie. Der Abstand zweier Punkte, in der klassischen (metrischen) Geometrie von zentraler Bedeutung, ist in der Topologie unwesentlich; in ihr gelten zwei Gegenstände bereits dann als gleich, wenn sie durch die genannten Verformungen auseinander hervorgehen. Durch diese Identifizierung lenkt die Topologie den Blick auf Eigenschaften räumlicher Gegenstände, die fundamentaler sind als diejenigen, die man durch Angabe von Längen und Winkeln ausdrücken kann.

Ein beliebtes Einführungsbeispiel ist die Aussage, dass das in den USA beliebte Gebäck namens »Kringel« *(doughnut)* eigentlich dasselbe ist wie eine Kaffeetasse mit Henkel. (Asketischere Naturen dürfen den Kringel durch einen Rettungsring oder Fahrradschlauch ersetzen.) Man

kann nämlich eine Tasse aus Knete durch Verformung in die Form eines Kringels bringen, ohne ein Loch hineinzuschneiden oder ein weiteres Knetegebilde an die Tasse anzukleben (Kasten S. 92). Eine Kugel aus Knete dagegen kann man nur dadurch zum Kringel machen, dass man entweder ein Loch in die Mitte hineindrückt oder die Kugel zu einem Zylinder ausrollt und dessen Enden zusammenfügt. Also sind Kugel und Tasse verschiedene Dinge – auch für einen Topologen.

Statt massiver Kugeln und Kringel kann man auch ihre Oberflächen studieren. Sie sind aus topologischer Sicht ebenfalls verschieden: Die Oberfläche der Kugel ist eine 2-Sphäre; sie lässt sich nicht in die Oberfläche des Kringels verformen. Die Mathematiker nennen diese Ringfläche einen Torus. Beide Gebilde, 2-Sphäre und Torus, sind zweidimensionale Mannigfaltigkeiten oder kurz Flächen.

Die Topologie wirft also vieles in einen Topf, aber nicht alles. Für Flächen stellt sich die nahe liegende Frage: Welche topologisch verschiedenen Flächen gibt es überhaupt, und wie kann man sie beschreiben? Auf diese Frage fanden die Topologen bereits Ende des 19. Jahrhunderts eine elegante Antwort: Es ist die Anzahl der »Henkel« oder auch der »Löcher«, welche die topologische Natur einer Fläche festlegt (Kästen S. 92 und 93). Man nennt diese Anzahl das Geschlecht der Fläche. Insbesondere erkannte man, dass die 2-Sphäre die einzige Fläche von besonderer Einfachheit ist, und begann sich zu fragen, ob sich die 3-Sphäre in ähnlicher Weise gegenüber den anderen 3-Mannigfaltigkeiten auszeichnet.

An dieser Stelle betritt Henri Poincaré die Szene, um 1900 einer der beiden Mathematiker von absolutem Weltrang (der andere war David Hilbert). Man nannte ihn auch den letzten Universalisten der Mathematik: Er brachte alle Zweige seines Fachs voran, bis zu Gebieten wie Himmelsmechanik, Elektromagnetismus und Philosophie der Wissenschaften. Über Letztere verfasste er mehrere viel gelesene Bücher.

Vor allem aber gilt Poincaré als Begründer des Zweiges der Mathematik, den man heute »algebraische Topologie« nennt. Um die Wende zum 20. Jahrhundert erarbeitete er einen Begriff, der in der Folge von zentraler Bedeutung für die Topologie wurde: Homotopie.

Homotopie: die Kunst, die Schlinge zuzuziehen

Stellen Sie sich vor, in der Mannigfaltigkeit liege eine geschlossene Kurve, eine »Schleife« – irgendwie. Sie darf sich beliebig oft überschneiden. Außerdem ist sie ebenso deformierbar wie die Mannigfaltigkeit selbst: Man kann sie nach Belieben in die Länge ziehen oder zusammenschrumpfen lassen, im Extremfall bis auf einen einzigen Punkt. Nur aus der Mannigfaltigkeit heraus darf man sie nicht bewegen. Zwei Schleifen, die sich auf diese Weise ineinander deformieren lassen, nennt man zueinander homotop.

Kann man unter diesen Bedingungen jede Schleife bis auf einen Punkt zusammenziehen? Nein. Bei einer Schleife, die einmal um den äußeren Rand eines Torus herumläuft, gelingt das nicht, denn das Loch in der Mitte ist ein Hindernis. Dagegen ist auf der 2-Sphäre jede Schleife nullhomotop, das heißt auf einen Punkt zusammenziehbar.

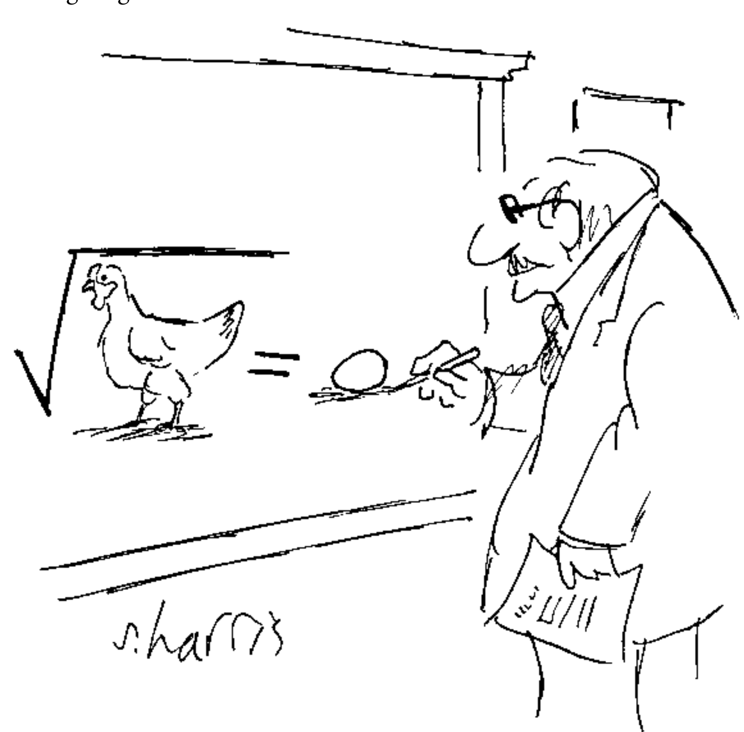
HULTON-DEUTSCH-COLLECTION / CORBIS

Poincaré (sitzend, im Gespräch mit Marie Curie) nahm 1911 an der ersten Solvay Physics Conference in Brüssel teil. Hinter ihm Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes (der wenige Monate zuvor die Supraleitung entdeckte) und Albert Einstein. Möglicherweise war dies das einzige Zusammentreffen von Einstein und Poincaré, der neun Monate später starb.

Man kann Aussagen über die topologischen Eigenschaften einer Mannigfaltigkeit machen, indem man bestimmt, welche wesentlich, das heißt bis auf Homotopie, verschiedenen Schleifen es auf ihr gibt: Das ist der Homotopietyp der Mannigfaltigkeit.

Für 2-Mannigfaltigkeiten (Flächen) sind derartige Aussagen sogar schon erschöpfend: Alles, was es topologisch über eine Fläche zu sagen gibt, ist mit ihrem Homotopietyp gesagt. Insbesondere ist jede Fläche, auf der jede Schleife nullhomotop ist, bereits der 2-Sphäre topologisch äquivalent.

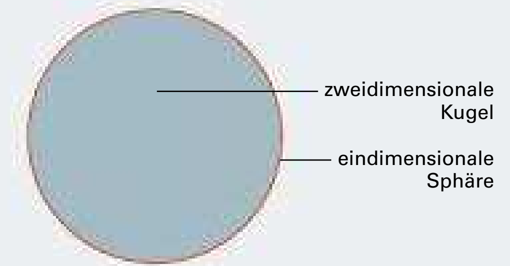
(Hier und schon zuvor haben wir stillschweigend angenommen, dass wir es mit orientierbaren Mannigfaltigkeiten zu tun haben. Eine nichtorientierbare Mannigfaltigkeit ist zum Beispiel das Möbiusband, das man erhält, wenn man die beiden Enden eines Streifens verdreht und dann aneinander klebt. Das Möbiusband hat zwar einen Rand und ist daher ohnehin nicht zugelassen, aber es gibt auch nichtorientierbare Mannigfaltigkeiten ▷

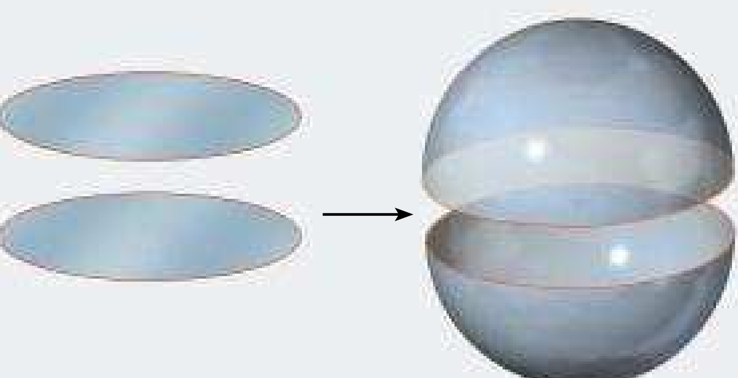


Sphärenmusik in höheren Dimensionen

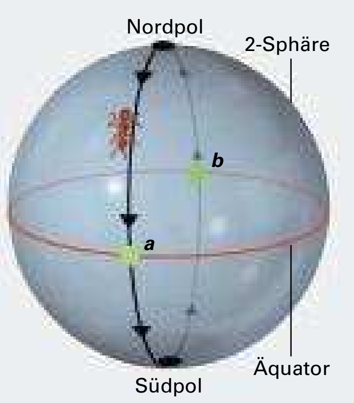
Um einen mathematischen Satz über die 3-Sphäre zu beweisen, muss man sie sich nicht unbedingt vorstellen können. Im Prinzip genügt es, Aussagen über die Eigenschaften dieses – abstrakten – Objekts logisch korrekt zu verknüpfen. Allerdings werden diese Eigenschaften in Begriffen wie »Kugel«, »Sphäre« und »Rand« ausgedrückt, unter denen man sich in niederen Dimensionen etwas vorstellen kann. Auch der Mathematiker lässt sich von diesen intuitiven Anschauungen leiten, muss allerdings aufpassen, dass er sie nicht zu wörtlich nimmt. Das gilt insbesondere für die 3-Sphäre.

1 Betrachten wir zunächst die Scheibe und den Kreis, der ihren Rand ausmacht. Die Mathematiker bezeichnen diese beiden Objekte als »zweidimensionale Kugel« und »eindimensionale Sphäre«. Eine »Kugel« bezeichnet immer ein ausgefülltes Objekt (Beispiel: Billardkugel), während die »Sphäre« die Oberfläche der Kugel ist (Beispiel: Luftballon). Der Kreis ist eindimensional, weil schon eine Zahl ausreicht, um einen Punkt auf ihm festzulegen.



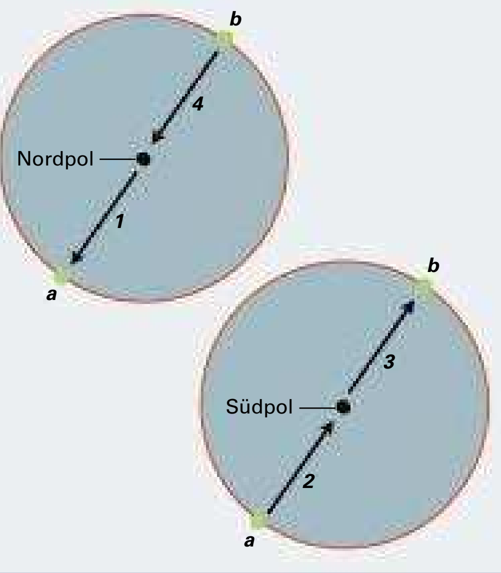


2 Aus zwei Exemplaren der zweidimensionalen Kugel, also zwei Scheiben, können wir eine zweidimensionale Sphäre bauen. Dazu beulen wir beide Scheiben zu halben Sphären (Hemi-sphären) aus, eine nördliche und eine südliche, und kleben sie an den Rändern zusammen, die dadurch zum Äquator werden. Fertig ist die 2-Sphäre!



3 Eine Ameise kriecht vom Nordpol aus entlang des Meridians von Greenwich immer geradeaus (links). Wenn wir ihren Weg statt auf der Sphäre auf den beiden Scheiben verfolgen (rechts), beginnt der Weg im Mittelpunkt der nördlichen Scheibe und verläuft in gerader Linie *(1)* bis zu deren Rand *(a)*. Dort springt er auf den entsprechenden Punkt der südlichen Scheibe über und verläuft in gerader Linie durch den Mittelpunkt der Scheibe zur anderen Seite *(2* und *3)*. Schließlich wechselt er wieder auf die nördliche Scheibe *(b)* und erreicht in gerader Linie den Nordpol *(4)*.

Ein Rundweg über die 2-Sphäre erscheint also als zwei Wege über die beiden Scheiben. Merkwürdigerweise scheint die Ameise beim Wechsel von einer Scheibe auf die andere die Laufrichtung zu wechseln.



ALLE GRAFIKEN: DON FOLEY

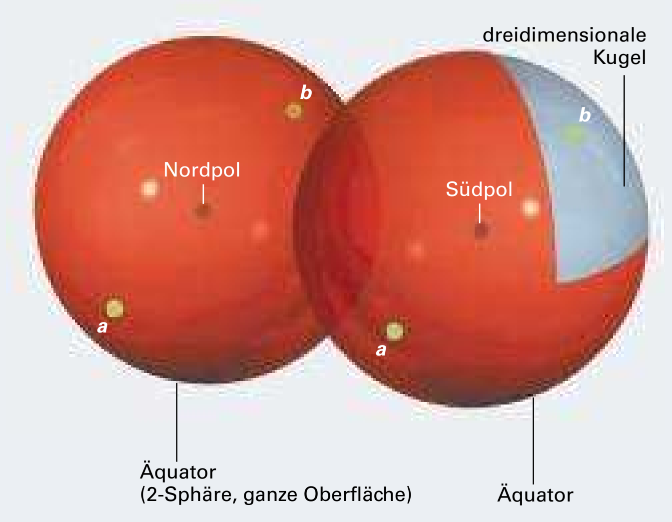
ohne Rand. Ein Beispiel ist die so genannte Klein'sche Flasche.)

Poincaré vermutete nun, dass analog auch jede 3-Mannigfaltigkeit, auf der alle Schleifen nullhomotop sind, bereits der 3-Sphäre äquivalent ist. Aber er konnte es nicht beweisen, und so ging die Behauptung als die Poincaré-Vermutung in die Geschichte ein. Im Laufe der Zeit behaupteten verschiedene Mathematiker immer wieder, dass sie die Vermutung bewiesen hätten, aber jedesmal erwiesen sich die Beweise als falsch. Perelmans Beweis ist der erste, der einer genaueren Untersuchung bisher standgehalten hat.

Ironischerweise kommen in seinem Ansatz die Längen und Winkel der metrischen Geometrie, vor denen der Topologe so sorgfältig die Augen verschließt, wieder zu Ehren. Eine Kaffeetasse und ein schöner runder Torus sind zwar topologisch dasselbe, aber an dem Torus sieht man wegen seiner ebenmäßigen Gestalt Dinge, die an der Kaffeetasse dem Blick verborgen bleiben. Allgemeiner gibt es zu jeder 2-Mannigfaltigkeit eine topologisch äquivalente, aber geometrisch besonders schöne Mannigfaltigkeit, gewissermaßen ein Musterbeispiel dieser topologischen Klasse. Die geometrisch perfekte Sphäre ist das Musterbeispiel für alle Flächen mit dem Homotopietyp der Sphäre, der Torus ist der entsprechende Vertreter für alle Flächen mit genau einem Henkel, und so weiter.

Geometrisierung: die Glättung der Kartoffel

Wie findet man zu, sagen wir, einer Kartoffel deren ideale geometrische Gestalt, nämlich die Sphäre? Indem man ihre vorstehenden Auswüchse eindrückt, ihre Dellen heraushebt, allgemein ihre Oberfläche so verändert, dass sie an allen Stellen die gleiche Krümmung hat. Dazu



4 Nun treiben wir dasselbe Spiel eine Dimension höher: Wir nehmen zwei dreidimensionale Kugeln und kleben sie entlang ihrer Ränder zusammen. In diesem Fall sind die Ränder allerdings zweidimensionale Sphären, und wir können uns nicht vorstellen, wie wir die in den vierdimensionalen Raum hinein ausbeulen sollen, damit wir sie zusammenkleben können. Aber das brauchen wir auch nicht unbedingt. Es genügt zu wissen, welcher Punkt am Rand der einen Kugel mit welchem Punkt am Rand der anderen verklebt wird.

Das Ergebnis der Klebung ist die 3-Sphäre. Sie ist ihrerseits die »Oberfläche« (der Rand) einer vierdimensionalen Kugel. (Die »Oberfläche« eines vierdimensionalen Gebildes ist etwas Dreidimensionales.) Wir können eine der beiden dreidimensionalen Kugeln die nördliche und die andere die südliche Hemisphäre nennen. Nord- und Südpol der 3-Sphäre entsprechen dann den Kugelmittelpunkten, genauso wie in Absatz 3 die Pole der 2-Sphäre den Mittelpunkten der beiden Scheiben entsprechen.

5 Stellen wir uns nun vor, die zwei dreidimensionalen Kugeln seien zwei große, leere Teilbereiche des Weltalls, und wir starteten mit einem Raumschiff am Nordpol und flögen geradewegs in eine beliebige Richtung. Irgendwann würden wir den »Äquator«, also den Rand der nördlichen Hemisphäre, erreichen *(1)*, kämen in die südliche Hemisphäre und würden dort, stets geradeaus, durch den Südpol wieder zum Äquator fliegen *(2* und *3)*. Danach kämen wir wieder in die nördliche Hemisphäre und zu unserem Nordpol zurück *(4)*. Die Rakete trifft ihre eigene Startrampe von hinten! Dies entspricht einer Reise auf dem Rand einer vierdimensionalen Kugel, also einer 3-Sphäre. Das Gebilde, das wir aus zwei dreidimensionalen Kugeln zusammengesetzt haben, ist genau die 3-Sphäre, um die es bei der Poincaré-Vermutung geht. Nach einigen Spekulationen ist unser Universum tatsächlich eine 3-Sphäre.

Den beschriebenen Vorgang kann man auf noch höhere Dimensionen verallgemeinern. Die n-Sphäre entsteht stets aus zwei n-dimensionalen Kugeln, die man entlang ihrer Ränder aneinanderklebt. Jeder der beiden Ränder ist dabei eine $(n-1)$-Sphäre, genau wie der Rand einer Scheibe (einer 2-dimensionalen Kugel) ein Kreis (eine 1-Sphäre) ist. Die so entstandene n-Sphäre wiederum ist der Rand einer $(n+1)$-dimensionalen Kugel.

muss gewissermaßen Krümmung von den stark positiv gekrümmten Stellen (Auswüchsen) zu den negativen transportiert werden, sodass sämtliche Differenzen sich ausgleichen. Tatsächlich kann man sich vorstellen, Krümmung sei so etwas wie Temperatur. Den physikalischen Prozess, der bewirkt, dass Temperaturunterschiede sich ausgleichen, kann man in einer mathematischen Gleichung (genauer: einer Differenzialgleichung) beschreiben. Nach dem Modell dieser Wärmeleitungsgleichung kann man eine Gleichung aufstellen, die den Ausgleich von Krümmungen beschreibt. Unter der Wirkung dieser Gleichung deformiert sich unsere Kartoffel allmählich zur Sphäre. Dabei »fließt« Krümmung von einer Stelle der Oberfläche zur anderen; diese Strömung heißt Ricci-Fluss *(Ricci flow)* nach dem italienischen Mathematiker Gregorio Ricci-Curbastro (1853–1925).

Die Idealgestalten der 2-Mannigfaltigkeiten haben nun stets konstante Krümmung, und zwar je nach topologischer Klasse verschiedene: Die Sphäre ist positiv gekrümmt, der Torus ist »flach«, das heißt, er hat Krümmung null, und alle Flächen höheren Geschlechts haben negative Krümmung (Kasten S. 93). Poincaré, Paul Koebe und Felix Klein (nach dem die Klein'sche Flasche benannt wurde) trugen zu dieser geometrischen Klassifikation, das heißt zur Geometrisierung der 2-Mannigfaltigkeiten, bei.

Es liegt nun nahe, ähnliche Techniken auch auf 3-Mannigfaltigkeiten anzuwenden. Kann man auch unter ihnen besonders wohlgeformte Exemplare finden, bei denen die Krümmung über die ganze Mannigfaltigkeit gleichverteilt ist? Das ist im Allgemeinen nicht möglich. Allerdings kann man eine 3-Mannigfaltigkeit in geeignete Teilstücke zerlegen, sodass jedes von ihnen eine der ausgezeichneten ▷

Geometrien besitzt, ähnlich wie man jede natürliche Zahl in Primfaktoren zerlegen kann. Außerdem gibt es bei den 3-Mannigfaltigkeiten nicht nur drei, sondern acht verschiedene Typen von besonderen Geometrien.

Dass man jede 3-Mannigfaltigkeit eindeutig durch eine solche Zerlegung beschreiben kann, ist genau die Aussage der Thurston'schen Geometrisierungsvermutung. Thurston und seine Kollegen bewiesen wichtige Teilaussagen dieser Vermutung; aber ein Kernstück, aus dem insbesondere die Poincaré-Vermutung gefolgt wäre, blieb offen.

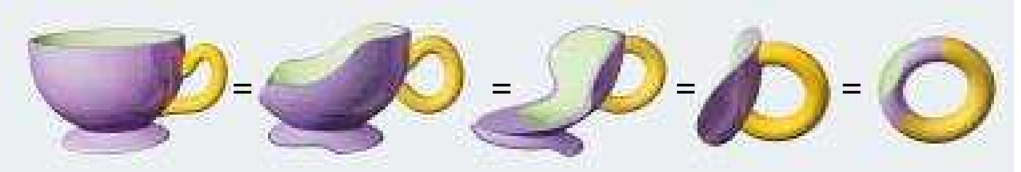
Von 1990 an versuchte der oben genannte Richard Hamilton 3-Mannigfaltigkeiten nach dem beschriebenen Verfahren zu glätten und damit zu geometrisieren. Leider stellte sich dabei heraus, dass der Ricci-Fluss sich in speziellen Situationen völlig anders verhält als eine Wärmeströmung: Unter der Deformation kann sich die Mannigfaltigkeit an gewissen Stellen bis auf einen Punkt zusammenschnüren. Das ist so, als würde es durch einen Temperaturausgleichsprozess an einer Stelle unendlich heiß werden! Wenn ein solcher Punkt, eine so genannte Singularität, entsteht, ist das geometrische Gebilde keine Mannigfaltigkeit mehr, denn es sieht in der Umgebung dieses Punkts nicht mehr wie der gewöhnliche 3-dimensionale Raum aus.

Das geschieht zum Beispiel beim dreidimensionalen Gegenstück einer Hantel: einer Mannigfaltigkeit aus zwei 3-Sphären, die durch einen dünnen Schlauch miteinander verbunden sind (Kasten S. 94). In ihrem Bestreben, schön gleichmäßig rund zu werden, verleiben sich die beiden Sphären beim Ricci-Fluss immer mehr von dem Verbindungsstück ein, sodass dieses immer dünner wird und schließlich zu einem Punkt zusammenschrumpft. Ähnliches geschieht, wenn an irgendeiner Stelle eine Art langgezogener Stachel aus der Mannigfaltigkeit herausragt: Es entsteht eine so genannte Zigarrensingularität.

Beide Typen von Singularitäten entpuppten sich als hartnäckige Hindernisse auf dem Weg zum Beweis der Poincaré'schen Vermutung. Erst Perelman gelang es, sie zu umgehen.

Topologie der Flächen

Die genaue Gestalt – die »Geometrie« – eines Objekts ist in der Topologie nicht entscheidend. Man kann sich ihre Gegenstände aus Knete oder Gummi vorstellen, sodass man sie nach Belieben strecken, stauchen und verdrehen kann, ohne dass dies Wesentliches verändert. Zerschneiden oder Zusammenkleben ist jedoch nicht erlaubt. So gesehen sind alle Oberflächen mit genau einem Loch, wie zum Beispiel eine Kaffeetasse und ein Kringel, im Wesentlichen dasselbe.



Jede zweidimensionale Mannigfaltigkeit (Fläche) ergibt sich aus der 2-Sphäre *(a)*, indem man die richtige Anzahl von Henkeln anklebt. (Hier wie im ganzen Artikel sind Flächen als kompakt, randlos und orientiert vorausgesetzt.) Nimmt man einen Henkel zur 2-Sphäre hinzu, so erhält man den Torus, die Oberfläche eines Kringels. Mit einem zweiten Henkel erhält man die so genannte Brezelfläche *(b)*. Sie ist vom Geschlecht 2, während der Torus das Geschlecht 1 hat. Allgemein ist das Geschlecht einer Fläche gleich der Anzahl ihrer Löcher oder auch gleich der Anzahl der Henkel, die man der 2-Sphäre ankleben muss.



Die 2-Sphäre ist die einzige Fläche, in der man eine beliebige eingebettete Schleife auf einen Punkt zusammenziehen kann *(a)*. Beim Torus beispielsweise kann das Loch in der Mitte dafür zu einem Hindernis werden *(b)*, und jeder weitere angeklebte Henkel würde ein neues Hindernis liefern.

Die Poincaré-Vermutung besagt, dass die 3-Sphäre in der gleichen Weise unter den 3-Mannigfaltigkeiten ausgezeichnet ist: Jede Schleife auf der 3-Sphäre kann man auf einen Punkt zusammenziehen, und auf jeder anderen 3-Mannigfaltigkeit gibt es dafür ein Hindernis.



Asket im Dienste der Mathematik

Perelman kam 1992 als frisch Promovierter (»Postdoc«) in die USA, verbrachte einige Semester an der Universität New York und in Stony Brook sowie zwei Jahre an der Universität von Kalifornien in Berkeley. Er machte sich schnell einen Namen als genialer junger Mathematiker und bewies einige wichtige Resultate in einem Teilbereich der Geometrie. Die European Mathematical Society zeichnete ihn dafür 1996 mit einem Forschungspreis aus (den er nicht annahm).

Außerdem erhielt er schon 1994 die prestigeträchtige Einladung, auf dem internationalen Mathematikerkongress ICM vorzutragen (die er annahm). Daraufhin boten ihm mehrere namhafte mathematische Institute Stellen an, die er aber alle ablehnte, um schließlich zurück nach St. Petersburg zu gehen. Ein amerikanischer Kollege kommentierte dies: »Er ist ein typischer Russe. Materielle Dinge spielen für ihn keine große Rolle.«

Zurück in Russland, verschwand Perelman zunächst wieder von der Bildfläche. Seine einzigen Lebenszeichen waren gelegentliche E-Mails, in denen er frühere Kollegen zum Beispiel auf Fehler in deren im Internet veröffentlichten Arbeiten hinwies. Fragen nach seinen eigenen Vorhaben blieben stets unbeantwortet.

Schließlich, im Jahre 2002, informierte er einige Leute per E-Mail über den

Geometrisierung

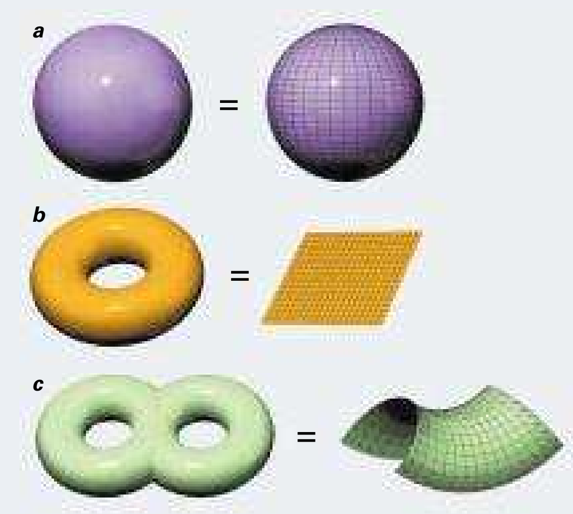
Man kann 2-Mannigfaltigkeiten (Flächen) durch die so genannte Uniformisierung oder Geometrisierung klassifizieren, das heißt dadurch, dass man jeder Fläche eine topologisch äquivalente mit einer besonders schönen geometrischen Struktur zuordnet. Insbesondere kann man eine Fläche so deformieren, dass die Krümmung auf ihr gleichmäßig verteilt ist.

- Die Sphäre *(a)* ist die einzige Fläche mit konstanter positiver Krümmung: In jedem ihrer Punkte scheint man auf einem (ziemlich flachen) Berggipfel zu stehen.
- Dem Torus *(b)* kann man eine flache Geometrie geben. Er sieht dann überall so aus wie eine (zweidimensionale) Ebene.
- Flächen, die aus dem Torus durch Ankleben weiterer Henkel entstehen *(c)*, haben eine Geometrie mit konstanter negativer Krümmung. Weitere Einzelheiten hängen von der Zahl der Henkel ab. Einen Bereich negativer Krümmung kann man sich wie einen Sattel vorstellen.

Warum ist der Torus flach, wo doch der Kringel an der Außenseite positiv (kugelähnlich), an der Innenseite negativ (sattelähnlich) gekrümmt ist?

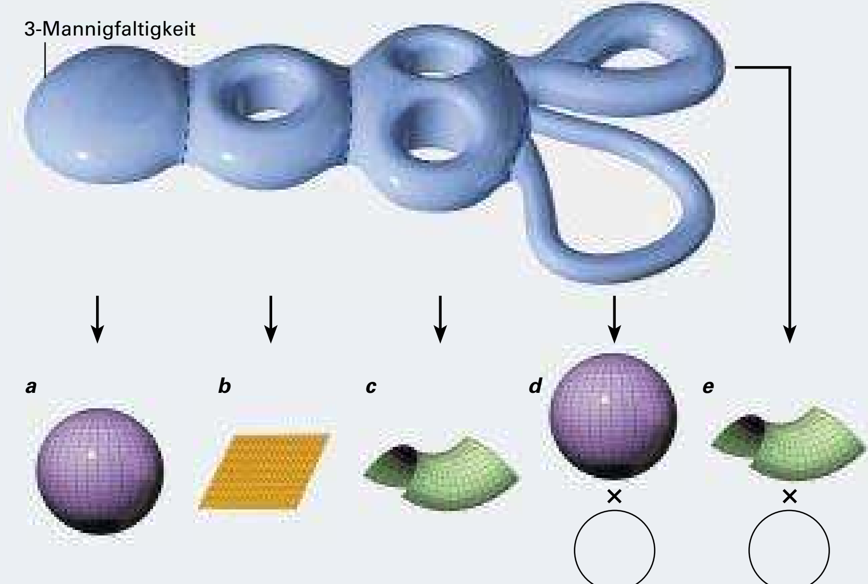
Die Mathematiker bestehen darauf, eine Mannigfaltigkeit nie »von außen« zu betrachten, sondern stets nur »von innen«, denn sie wollen auch dann von Mannigfaltigkeiten sprechen, wenn es einen »umgebenden Raum« nicht gibt oder man nichts über ihn weiß. Deswegen wird Krümmung »intrinsisch«, das heißt von innen definiert: Ein Bewohner der Mannigfaltigkeit steckt einen Kreis mit dem (kleinen) Radius r um seinen Standpunkt ab und bestimmt seine Fläche. Ist der Wert πr^2, dann hat seine Welt an dieser Stelle die Krümmung null; ist er kleiner, dann ist die Krümmung positiv, ist er größer, dann ist sie negativ.

Obendrein misst der Bewohner einer Mannigfaltigkeit Entfernungen und damit Flächen nicht unbedingt so wie ein Beobachter »von außen«. Auf der 2-Sphäre ist der Entfernungsbegriff (die »Metrik«) derselbe wie in dem Raum, in den die Sphäre eingebettet ist. Der geometrisierte Torus dagegen erbt seine Metrik von dem Quadrat, aus dem man sich ihn entstanden denken kann: Man klebe dessen obere und untere Seite zusammen und rolle damit das Quadrat zur Röhre. Diese



biege man rund und füge beide Öffnungen zum Kringel zusammen; das entspricht dem Zusammenkleben von rechter und linker Seite des Quadrats.

Wenn man auf das Quadrat »Rechenkästchen« zeichnet, also ein Gitternetz von geraden Linien gleichen Abstands, dann sind diese Linien auf dem Torus, »von außen« betrachtet, auf der Innenseite zusammengedrängt und auf der Außenseite auseinander gezogen. Aus der (einzig maßgeblichen) »Binnenperspektive« ist der Torus jedoch einfach flach.



Die Klassifikation der 3-Mannigfaltigkeiten, die durch die Arbeiten von Perelmann ihren Abschluss fand, verläuft im Prinzip ähnlich, ist jedoch um einiges komplizierter. Im Allgemeinen kann man eine 3-Mannigfaltigkeit in Teile zerlegen, deren jeder mit einer von acht möglichen Standardgeometrien ausgestattet werden kann. In der Zeichnung (links), in der wir eine 3-Mannigfaltigkeit schematisch durch eine 2-Mannifaltigkeit dargestellt haben, kommen fünf von diesen Geometrien vor: die konstant positiv gekrümmte *(a)*, die flache *(b)*, die konstant negativ gekrümmte *(c)*, das »Produkt« aus einer 2-Sphäre mit einem Kreis *(d)* und das »Produkt« einer negativ gekrümmten Fläche mit einem Kreis *(e)*.

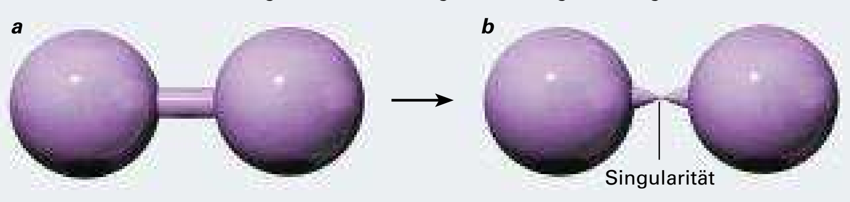
ersten der beiden oben erwähnten Artikel, den er soeben ins Netz gestellt hatte: Sie könnten ihn vielleicht interessant finden, erklärte er – eine wirklich sehr bescheidene Formulierung angesichts der Tatsache, dass die Arbeit bereits alles Wesentliche zur Lösung des Jahrhundertproblems enthielt. In dem Artikel bedankt er sich außer bei seinem Arbeitgeber, dem Steklow-Institut für Mathematik, auch bei den amerikanischen Instituten, die ihn als Postdoc beschäftigt hatten, weil er in der Zwischenzeit von dem damals angesparten Geld gelebt hatte.

Perelmans wesentliche Idee bestand darin, einen weiteren Term zu der Gleichung für den Ricci-Fluss hinzuzunehmen. Das verhinderte zwar nicht das Auftreten von Singularitäten, gestattete jedoch eine wesentlich weiter gehende Analyse. Die Singularität, die bei der drei- ▷

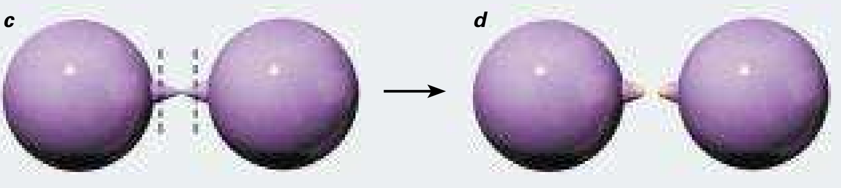
Umgang mit Singularitäten

Der Versuch, eine 3-Mannigfaltigkeit zu geometrisieren und damit die Poincaré'sche Vermutung zu beweisen, scheitert zunächst an so genannten Singularitäten. Das geschieht zum Beispiel, wenn die Mannigfaltigkeit die Form einer dreidimensionalen Hantel hat, das heißt, aus zwei 3-Sphären besteht, die durch einen dünnen Schlauch miteinander verbunden sind *(a)*. (Mangels ausreichender Dimensionen zum Darstellen müssen hier wie im ganzen Artikel 3-Mannigfaltigkeiten durch ihnen ähnliche 2-Mannigfaltigkeiten wiedergegeben werden.)

Der Ricci-Fluss, der eigentlich auf Ausgleich von Krümmungsunterschieden gerichtet ist, schnürt in diesem Fall den Schlauch in der Mitte zu einem Punkt zusammen, sodass das entstehende Gebilde keine Mannigfaltigkeit mehr ist *(b)*. Außerdem könnte ein zweiter Singularitätentyp auftreten: die so genannte Zigarrensingularität.



Perelmans Lösung des Problems heißt »Chirurgie«. Kurz bevor sich der Schlauch einschnürt, schneidet man ein Stück beiderseits der kritischen Stelle weg und verschließt die Löcher mit kleinen 3-Kugeln; in zwei Dimensionen wären es Scheiben *(c)*. Dann verfolgt man den modifizierten Ricci-Fluss weiter *(d)*. Möglicherweise treten weitere Singularitäten auf und erfordern chirurgische Eingriffe. Perelman zeigte jedoch, dass dies nur endlich oft geschieht und der Prozess damit zu einem Ende kommt. Außerdem zeigte er, dass die genannten Zigarrensingularitäten gar nicht auftreten können.



▷ dimensionalen Hantel auftritt, konnte er durch »Chirurgie« auflösen: Man schneidet den dünnen Schlauch beiderseits der kritischen Stelle weg und verschließt die beiden verbleibenden Enden mit jeweils einer Kugel (Kasten oben). Danach kann man den modifizierten Ricci-Fluss für die neue Geometrie weiterverfolgen, bis sich vielleicht wieder eine Singularität zu bilden droht. Dies kann man wieder mit der gleichen Methode verhindern. Perelman zeigt, dass man eine solche Chirurgie nur endlich oft durchführen muss. Am Ende ist die Mannigfaltigkeit in Teile zerlegt, die jeweils eine der acht besonderen Geometrien tragen. Der zweite Singularitätentyp Hamiltons, die Zigarrensingularität, kann bei seiner Methode gar nicht erst auftreten.

Wenn man diesen Prozess auf eine 3-Mannigfaltigkeit anwendet, die vom gleichen Homotopietyp wie die 3-Sphäre ist, erhält man dabei eine runde 3-Sphäre. Also war, topologisch gesehen, die Mannigfaltigkeit von Anfang an schon eine 3-Sphäre. Das ist genau die Aussage der Poincaré'schen Vermutung.

Unerwartete Anwendungen

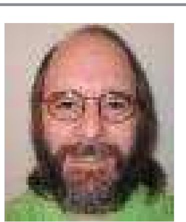
Über das eigentliche Ergebnis hinaus liefern Perelmans neue Methoden wertvolle Beiträge zur Analysis. Verschiedene Analytiker verwenden sie für Probleme gänzlich anderer Art.

Außerdem hat sich ein merkwürdiger Bezug zur Physik aufgetan. Der Ricci-Fluss steht im Zusammenhang mit der so genannten Renormierungsgruppe. Das ist ein Mittel, um zu beschreiben, wie sich die Stärke von Wechselwirkungen in Abhängigkeit von der Kollisionsenergie verändert. Die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung wird bei niedrigen Energien durch die (dimensionslose) Zahl 0,0073 (ungefähr 1/137) beschrieben. Wenn zwei Elektronen mit fast Lichtgeschwindigkeit, also mit sehr hohen Energien, frontal zusammenstoßen, liegt die entsprechende Zahl eher bei 0,0078.

Erhöhung der Energie läuft darauf hinaus, den Vorgang aus kürzerer Distanz zu beobachten. Die Renormierungsgruppe entspricht damit einem Mikroskop, bei dem man die Vergrößerung einstellen kann, je nachdem, ob man einen Prozess in gröberem oder feinerem Maßstab beobachten möchte. Ähnliches leistet der Ricci-Fluss: Er glättet Unregelmäßigkeiten genauso aus wie ein Mikroskop, das immer näher an die Mannigfaltigkeit herangefahren wird, wodurch sie immer glatter erscheint. Die Mathematik der Renormierungsgruppe ist derjenigen, die zur Beschreibung der Geometrisierung verwendet wird, sehr ähnlich.

Schließlich hat die Gleichung des Ricci-Flusses auch einen Bezug zu den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Wirkung der Schwerkraft und die Struktur unseres Universums im Großen beschreiben. Der von Perelman hinzugefügte Term kommt in der Stringtheorie vor, die eine quantisierte Version der Gravitationstheorie ist. Möglicherweise gewähren Perelmans neue Techniken und Methoden auch neue Einblicke in die Allgemeine Relativitätstheorie und die Stringtheorie. In diesem Fall hätten wir durch seine Arbeiten nicht nur die Struktur von 3-Mannigfaltigkeiten im Allgemeinen, sondern auch die Struktur des Raumes, in dem wir leben, besser verstanden. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Graham P. Collins hat Mathematik und Physik studiert und ist Redakteur bei Scientific American.

Einsteins Uhren, Poincarés Karten. Die Arbeit an der Ordnung der Zeit. Von Peter Galison. S. Fischer, Frankfurt am Main 2003

Geometrization of 3-manifolds via the Ricci flow. Von Michael T. Anderson, in: Notices of the AMS, Bd. 51, S. 184, 2004

Towards the Poincaré conjecture and the classification of 3-manifolds. Von John Milnor, in: Notices of the AMS, Bd. 50, S. 1226, 2003

Stephen Smale: The mathematician who broke the dimension barrier. Von Steve Batterson. American Mathematical Society, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PSYCHOLOGIE

Bas Kast

Die Liebe

und wie sich Leidenschaft erklärt

S. Fischer, Frankfurt am Main 2004. 224 Seiten, € 17,90

Warum verlieben wir uns? Wie verführt man einen Menschen? Was macht uns attraktiv? Macht Liebe blind? Ziehen Gegensätze sich an? Was passiert mit uns, wenn wir verrückt nach jemandem sind? Bas Kast, Wissenschaftsredakteur beim Berliner »Tagesspiegel«, schrieb alles auf, was die Wissenschaft an Antworten dazu bieten kann – und das ist erstaunlich viel.

Oder wussten Sie, dass Frauen durch Einnahme der Pille einen veränderten Geruchssinn haben und plötzlich auf einen anderen Männertyp stehen? War Ihnen klar, dass weltweit alle Menschen im Kern das Gleiche wollen, wenn es um ihren Traumpartner geht? Von den Liebesforschern befragt, gaben Angehörige der verschiedensten Kulturen, Religionen und Schichten verblüffend ähnliche Antworten. Frauen suchen einen Mann, der einerseits gute Gene hat und andererseits ein treuer Ehegatte und fürsorglicher Vater ist. Wussten Sie, dass diese beiden Eigenschaften sich schon aus hormonellen Gründen widersprechen? In der Tendenz ist ein hoher Testosteronspiegel ein Zeichen für Stärke und Gesundheit, macht einen Mann aber gleichzeitig aggressiv und flatterhaft.

Nachdem die erste Verliebtheit sich gelegt hat und eine lange Beziehung zu knirschen droht, treten Partnerforscher auf den Plan, beobachten die Paare und finden Verhaltensmuster, darunter die »fünf apokalyptischen Reiter«. So nennt Kast die typischen Vorboten einer Trennung: Kritik, Verteidigung, Verachtung, Rückzug und Machtdemonstration.

An dieser Stelle geht Kast noch einen Schritt weiter: Aus den Ergebnissen leitet er eine Kampfstrategie gegen die apokalyptischen Reiter ab und entwickelt darüber hinaus eine Art Gebrauchsanweisung für die Liebe. Zuwendung, Wir-Gefühl, Akzeptanz, positive Illusionen und Aufregung im Alltag sind demnach die Schlüssel zum Erfolg.

Schnödes Psychogelaber, das in der Realität gar nichts bringt? Nein, denn Kasts Rezepte sind wissenschaftlich abgesichert. So ergibt sich aus der Auswertung von Partnergesprächen, dass die Vermeidung geläufiger Fehler erlernbar ist und eine Beziehung retten kann.

Offen, zurückhaltend und mit einer großen Portion Humor bringt der Autor seine eigenen Erfahrungen in erfrischend lebhafter Sprache ein. Weder lässt er die Illusion aufkommen, Wissenschaft könne jeden Liebeskummer wegforschen, noch maßt er sich an, die Weisheit mit Löffeln gefressen zu haben. Er gibt sogar zu: Auch er ist verliebt – und zwar bis über beide Ohren.

Ein Universalrezept zum Glück hat auch Bas Kast nicht gefunden. Aber sein Buch bietet mehr als alle Illustrierten-Psychotests der vergangenen Jahre zusammen. In einer Zeit, in der es scheint, als hätten die Menschen zu lieben verlernt, macht dieses Buch Sinn.

Dagny Lüdemann

Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.



▶ **Im Experiment hält jeder zwölfte Mann bereits den ersten schüchternen Blick der schönen Schauspielerin für ein eindeutiges Flirtsignal.**



◀ **Wolfgang Ketterle erhielt 2001 den Physik-Nobelpreis für die Herstellung eines Bose-Einstein-Kondensats.**

PHYSIK

Brigitte Röthlein

Die Quantenrevolution

Neue Nachrichten aus der Teilchenphysik

Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2004. 230 Seiten, € 14,50



Die Zeiten des Jammerns über die Quantenphysik sind vorbei. Ausschlussprinzipien, die Unmöglichkeit, zwei Größen wie Ort und Impuls gleichzeitig zu messen, und die ins Unbestimmte verlaufende Wellenfunktion eines Teilchens – Experimentatoren sehen das nicht mehr als beklagenswerte Einschränkungen, sondern greifen mutig nach den Chancen, die sich aus der neuen Physik ergeben. Dies stellt Brigitte Röthlein, Wissenschaftsjournalistin von Beruf, in ihrem jüngsten Buch anschaulich vor. Sie berichtet von physikalischen Versuchen und deren Ergebnissen, die sich oft genauso unglaubwürdig anhören wie die Theorie. Leser dieser Zeitschrift werden viele Phäno- ▷

mene wiedererkennen: das Bose-Einstein-Kondensat (Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 28), die Verschränkung quantenmechanischer Zustände (4/2003, S. 48) oder die Quanten-Teleportation (6/2000, S. 30).

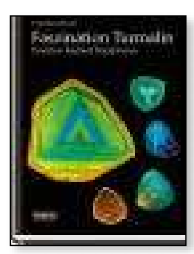
Trotz der anspruchsvollen Materie schreibt die Autorin erfrischend locker. Sie schildert ausführlich, wie Wissenschaftler in Laboratorien auf der ganzen Welt Photonen oder andere Teilchen verschränken, um damit beispielsweise Vorstufen des Quantencomputers zu erschaffen oder den wirklich absolut abhörsicheren Datenaustausch zu ermöglichen. Dabei beschreibt sie die Zusammenhänge wohltuend redundant, sodass der Leser auch den diffizilsten Experimenten stets folgen kann. Sie setzt sich damit erfreulich von dem zu den Sachbüchern übergeschwappten wissenschaftlichen Brauch ab, alles, auch Wichtiges und Schwieriges, möglichst nur einmal zu sagen.

Brigitte Röthlein beschränkt sich nicht darauf, ausländische Wegbereiter dieser Forschung vorzustellen, sondern benennt etliche deutschsprachige Wissenschaftler von Weltruf, auch wenn diese oft zwangsläufig Erfahrungen beiderseits des Atlantiks gesammelt haben. Ausführlich würdigt sie Anton Zeilinger mit seiner Quantenkryptografie, ebenso wie Wolfgang Ketterle mit seinen Versuchen zum Bose-Einstein-Kondensat.

Die vielen bekannten Orte, an denen geforscht wird, wie die Gipfel von Zugspitze und Wendelstein in den Alpen oder das unterirdische Kanalnetz Wiens, verdeutlichen zugleich, dass diese Arbeiten nicht weit entfernt von uns in einem »Elfenbeinturm« stattfinden, sondern in unserer unmittelbaren Nachbarschaft. Der Mitreisende im Zugabteil könnte durchaus einer dieser Quantenjongleure sein, und die ansehnlichen jungen Männer, die in dem Buch abgebildet sind (Bild auf der vorigen Seite), sehen nicht gerade so aus wie das landläufige Bild vom hoch angesehenen Professor oder Nobelpreisträger – sind aber manchmal beides!

Gerhard Samulat

Der Rezensent ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.



MINERALOGIE

Paul Rustemeyer

Faszination Turmalin

Formen Farben Strukturen

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003. 310 Seiten, € 95,95

Es gibt Fachbücher – und es gibt Bücher von Fachleuten, die aus reiner Begeisterung für die Sache geschrieben wurden. Das vorliegende Buch gehört zu den Letzteren.

Turmalinscheiben sind heute in fast jeder Mineraliensammlung vertreten; das Buch will dazu anregen, sich nicht nur über deren Schönheit zu freuen, sondern die Formen differenzierter zu betrachten und sie wenigstens teilweise aus der Entstehung der Kristalle zu verstehen.

Paul Rustemeyer, von Beruf Chemiker, ist offensichtlich nicht nur ein Mineralienkenner, sondern auch ein ausgezeichneter Fotograf; alle Bilder stammen von ihm. In Tassilo Deyer stand ihm außerdem ein Meister in der Anfertigung von Dünnschliffen zur Seite. Viele der Abbildungen sind schon für sich betrachtet Meisterwerke; vielleicht wären sie besser dem Buch lose in einer Mappe beigegeben worden, denn man würde sie durchaus gerne ausschneiden und aufhängen.

Der begleitende Text macht den geringeren Teil des Buchs aus. Die ersten vier Kapitel geben eine allgemeine Einführung. Turmaline finden sich in Pegmatit, jenem grobkörnigen Gestein, das sich als letztes aus einer Granitschmelze verfestigt, nachdem die anderen Bestandteile auskristallisiert sind. Den Nichtgeologen erstaunt, was alles erforderlich ist, damit die Kristalle entstehen können, insbesondere auch, welche Rolle das Wasser bei diesen Prozessen spielt. Nur in wenigen Fällen wird angedeutet, wie man im Einzelnen zu den Vorstellungen über das Wachstum der Kristalle kommt.

Es folgen Ausführungen zur chemischen Zusammensetzung der Turmaline, zu ihrer Kristallstruktur und, im Zusammenhang damit, ihren physikalischen Eigenschaften sowie eine kleine Einführung in die Kristallografie. Hier wird die Systematik der Kristallstrukturen übersichtlich erklärt und durch verständliche Grafiken unterstützt.

In den folgenden sechs Kapiteln wird der Leser mit der Formen- und Farbenvielfalt der Turmaline vertraut gemacht. Es braucht eine gewisse Anstrengung des



Dieser Schörlkristall ist in Form einer spitzen dreiseitigen Pyramide gewachsen, was sich im Dünnschliff quer zur Pyramidenachse als konzentrische Dreiecke zeigt (oben, blau). Die ebenfalls dreieckigen Deltastrukturen sind mit der Spitze zur Achse hin gerichtet.

räumlichen Vorstellungsvermögens, um aus den verschiedenen Querschnitten die Gestalt und den inneren Aufbau des Kristalls zu rekonstruieren, aber es ist der Mühe wert: Man lernt, wie der Mineraloge aus kleinen Besonderheiten von Form und Farbe Rückschlüsse auf die Entstehungsbedingungen zieht. Texte und zugehörige Abbildungen sind so instruktiv, dass man damit Turmaline und Scheiben selbstständig analysieren und beurteilen kann.

Im letzten Kapitel werden – wohl erstmals in der Literatur – die so genannten Deltastrukturen beschrieben, die Deyer und Rustemeyer in Dünnschliffen einiger Schörlkristalle entdeckten. Schörle sind schwarze Turmaline; ihre senkrecht zur Längsachse geschnittenen Scheiben bleiben schwarz und undurchsichtig, bis sie einige zehntel oder hundertstel Millimeter dünn geschliffen werden. Dann werden sie durchscheinend, und in etwa jedem hundertsten Kristall finden sich farbige Deltastrukturen, zarte, schleierartige Dreiecksformen, deren Spitze zur Mitte, das heißt zur Kristallachse weist. Mehrere solcher Formen bilden, unter dem Mikroskop sichtbar, wunderbare »Landschaften«.

Diese Entdeckung war wohl der Anlass, das Buch überhaupt zu schreiben, und Rustemeyer schlägt auch eine Erklärung dieser Strukturen vor. Josef Arnoth vom Naturhistorischen Museum Basel konnte mir, durch das vorliegende Buch darauf aufmerksam geworden, ähnliche Strukturen makroskopisch in einer »normalen« Scheibe eines Elbait (einer weiteren Turmalinart) zeigen.

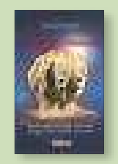
Einige Bildverweise sind falsch, was man allerdings leicht bemerkt; und manche Erklärungen hätte ich lieber als Erklärungsangebot gelesen, weil mir auch andere Wege möglich erscheinen. Aber das schmälert den positiven Gesamteindruck kaum, wird man sich doch in erster Linie an den Abbildungen freuen.

In diesem Sinne ist das Buch jedem zu empfehlen. Dem Verlag ist zu danken, dass er es in dieser hervorragenden Ausstattung herausgebracht hat, obgleich es nicht vorrangig der Wissenschaft, sondern der Schönheit der Natur gewidmet ist. Die Abbildungen rechtfertigen den vergleichsweise hohen Preis.

Johannes Kühl

Der Rezensent ist Physiker und leitet die Naturwissenschaftliche Sektion am Goetheanum in Dornach (Schweiz).

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

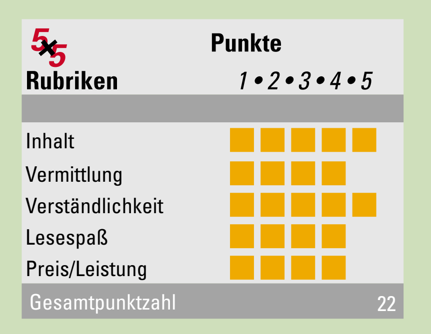


Manfred Spitzer
Selbstbestimmen
Gehirnforschung und die Frage: Was sollen wir tun?
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003, 400 Seiten, € 29,95

Wir sind ständig damit beschäftigt, Entscheidungen zu treffen, von der wahrscheinlich häufigsten Entscheidung unseres Lebens – etwa 3 Mal pro Sekunde entscheiden wir, wohin wir unseren Blick bewegen – bis hin zu der (weniger häufigen) Frage, welches Auto wir kaufen oder wen wir heiraten sollen.

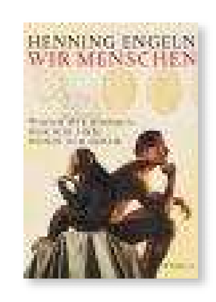
Doch wie verarbeitet das Gehirn Bewertungen; wie schlagen sich diese Bewertungen in handlungsleitenden Werten nieder; und wie zuverlässig sind Werte und Erfahrungen als Kompass für den Alltag? Manfred Spitzer hat sich dieser Fragen angenommen und damit ein Buch geschrieben, das alle, die über ihr eigenes Tun reflektieren, brennend interessieren sollte!

Aus der Rezension von Miriam Spering



5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	22

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5



ANTHROPOLOGIE

Henning Engeln

Wir Menschen

Woher wir kommen, wer wir sind, wohin wir gehen

Eichborn, Frankfurt am Main 2004. 445 Seiten, € 24,90

Das Buch des Hamburger Wissenschaftspublizisten erhebt einen hohen Anspruch. Henning Engeln will die Entstehung des Menschen aus biologischer Perspektive nachzeichnen und zum Verständnis seiner heutigen Neigungs- und Interessensituation verfolgen. Dabei wendet er sich an den naturwissenschaftlich interessierten Leser, aber auch – wie er in der Einleitung klar macht – an jene religiös gläubigen Menschen, die in den Lücken des wissenschaftlichen Weltbilds Handlungsspielraum für das Walten des (christlichen) Gottes sehen. Diese heute auch von theologischer Seite als fragwürdig angesehene metaphysische Begründungsfigur wirkt sich aber zunächst auf den weiteren Duktus des Buchs nicht aus.

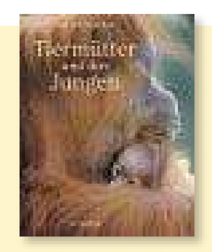
Engeln schildert in einer sehr angenehm zu lesenden, klaren Sprache die Geschichte des prähistorischen Menschen, wobei er geschickt biografische Details der Forscher und die vielen Zufälligkeiten der Funde und Entdeckungen in die systematische Darstellung einflicht. Mit besonderer Akribie widmet er sich der Entdeckungsgeschichte und der Einordnung des Neandertalers, der ja den Anthropologen des 19. Jahrhunderts große Rätsel aufgegeben hatte.

Aus diesem Kapitel des Buchs ist der Abschnitt über die Entwicklung des Gehirns wohl der interessanteste. Spannend und unter Berücksichtigung allerjüngster Forschungen beschreibt der Autor den Übergang vom Tier zum Menschen, samt den evolutiven Faktoren, die vermutlich zum Werkzeuggebrauch und zur Ausbildung von Sprache führten.

Im zweiten Teil wertet Engeln die Verhaltensneigungen aus, die der heutige Mensch im Verlauf der Evolution erworben hat, und versucht daraus die Komplexität seiner Verhaltensmuster zu verstehen. Geschickt und mit vielen anschaulichen Beispielen schildert er die Schwierigkeiten der Geschlechter miteinander, die teilweise unglaublichen Monstrositäten im Bereich der Aggression sowie die physiologischen Grundlagen der Emotionen. Vor allem der erste Komplex, die biologischen Wurzeln des Partnerschaftsverhaltens, hat auch praktische Relevanz: Wer weiß, mit welchen Mechanismen das Gehirn eines jeden von der Evolution ausgestattet wurde, wird mehr Verständnis für unangenehme Reaktionsmuster – wie zum Beispiel Eifersucht – aufbringen.

Im dritten Teil verlässt der Autor die biologische Ebene und wendet sich dem Verhältnis von natürlichem Denken und künstlicher Intelligenz zu. In der weltanschaulich sehr vorbelasteten Debatte zur Einordnung der maschinellen Denkfähigkeit ist er bereit, auch »mancher Software eine gewisse Teilintelligenz« zuzugestehen; aber gegenüber den extravaganten Utopien mancher Computertheoretiker wie Raymond Kurzweil wahrt er eine wohltuende Skepsis: So bald werden künstliche intelligente Apparate den Menschen nicht überflügeln.

Zuletzt befasst sich der Autor noch mit Astrophysik und Kosmologie und



ZOOLOGIE

Anup und Manoj Shah

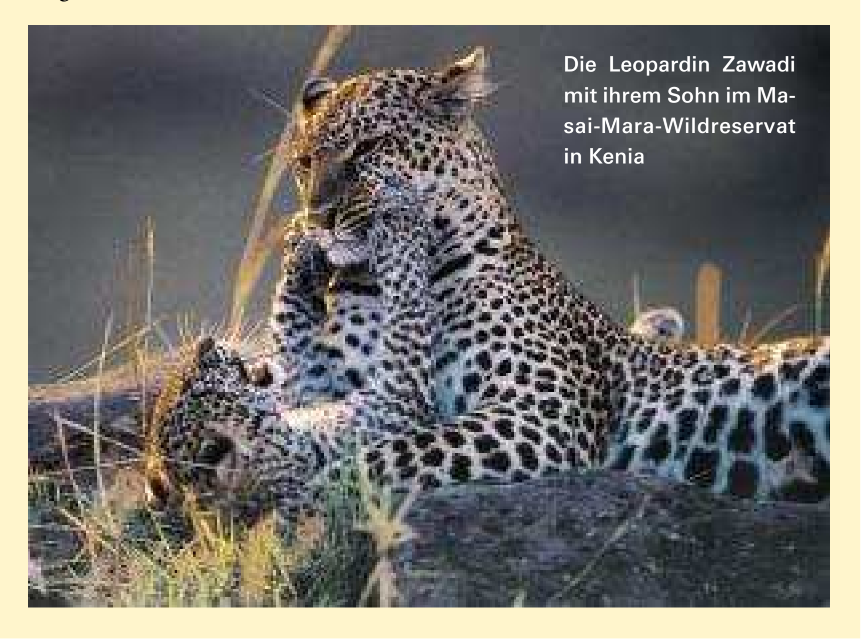
Tiermütter und ihre Jungen

Aus dem Französischen von Regina Enderle.
Gerstenberg, Hildesheim 2003. 224 Seiten, € 39,90

Tierkinder sind ja unzweifelhaft niedlich, und Löwen- und Elefantenbabys samt fürsorglicher Mutter ganz besonders. Die Tierfotografen Anup und Manoj Shah, Brüder aus Kenia, die nach dem Studium in London wieder in ihre Heimat zurückkehrten, verstehen ebenso unbestreitbar ihr Handwerk. Das Buch ist eine Sammlung eindrucksvoller und zum Teil anrührender Tierbilder – auch wenn nicht alle in der freien Wildbahn aufgenommen wurden.

Aber der von Anup Shah verfasste Text ist weit gehend unbrauchbar. Bei aller Niedlichkeit – Tiere sind eben keine Menschen, und es führt in die Irre, wenn man ihr Verhalten vermenschelnd beschreibt. Viele Motive sind wild in das jeweilige Bild hineininterpretiert, zahlreiche Fehler haben sich eingeschlichen, und die gelegentlich anklingende Soziobiologie hat der Autor offensichtlich auch nicht verstanden.

Adelheid Stahnke



Die Leopardin Zawadi mit ihrem Sohn im Masai-Mara-Wildreservat in Kenia

stößt dabei auf die oben erwähnten metaphysischen Fragen. Offensichtlich beeindruckt durch die naiven Projektionen religiöser amerikanischer Forscher, kolportiert er die seltsame Vorstellung, dass man aus den Temperaturkontrasten der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung die Spuren göttlicher Tätigkeit herauslesen könne. Ohne es wörtlich zu erwähnen, führt er auch das anthropische Prinzip und Frank Tiplers kuriose Physik der Unsterblichkeit an, wobei ihm entgangen zu sein scheint, dass die Wissenschaftstheorie diese Konzepte längst als unhaltbar erwiesen hat. Seltsam unkritisch und leichtgläubig wird der Autor, wenn er Bekenntnisse und Geständnisse frommer Naturwissenschaftler sammelt und – allerdings stets mit Vorbehalt – als neue metaphysische Entdeckungen einer religiös gewordenen Naturwissenschaft anführt. Dabei spiegeln diese interpretatorischen Naivitäten nur die Tatsache wider, dass deren Urheber weder David Hume noch Immanuel Kant noch moderne Wissenschaftstheoretiker gelesen haben. Wie kann man übersehen, dass jedes Eingreifen einer transzendenten

Ein Gotteserlebnis auf Knopfdruck wirkt wenig glaubwürdig

Macht in den Ablauf der Natur sämtliche Erhaltungssätze verletzen würde?

Seltsamerweise zitiert Engeln danach die Experimente von Neurologen, die transzendente Erfahrungen physiologisch stimulieren können. Das wäre so etwas wie ein Gotteserlebnis auf Knopfdruck – nicht gerade eine Stütze für die naiv-religiöse Position. Darüber hinaus gibt es gute evolutionsbiologische Gründe dafür, dass eine verzerrte Wahrnehmung der Realität einen Überlebensvorteil bieten kann. Wenn also ein spirituelles Erlebnis dem Erlebenden sogar nützlich ist, besteht noch ein Anlass weniger, es metaphysisch zu deuten. Der Autor schwankt zwischen verschiedenen Interpretationen, kann sich philosophisch aber nicht richtig entscheiden.

Lassen wir die religionsphilosophischen Bemerkungen beiseite; was übrig bleibt, ist immer noch ein lesenswerter Bericht über die moderne biologische Anthropologie.

Bernulf Kanitscheider

Der Rezensent ist Professor für Philosophie der Naturwissenschaften in Gießen.

ANZEIGE

ÖKONOMIE

Joseph E. Stiglitz

Die Roaring Nineties

Der entzauberte Boom

Aus dem amerikanischen Englisch von Thorsten Schmidt.
Siedler, Berlin 2004. 350 Seiten, € 24,–



Der Aufschwung der amerikanischen Wirtschaft in den neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts war länger und stärker, als dies je beobachtet wurde. Kaum ein Tag verging, an dem die Aktienkurse nicht neue Rekordhöhen erreichten. Unzählige Internetdienstleister und Biotechnologieunternehmen wurden gegründet und sofort an die Börse gebracht. Obwohl diese Unternehmen noch keine Gewinne erzielten, stiegen ihre Aktienkurse mit beispielloser Geschwindigkeit. Die Manager, aber auch die jungen Mitarbeiter von Finanzdienstleistern bekamen Gehälter in bis dahin unvorstellbarer Höhe.

Gleichzeitig gelang es der Regierung Clinton, die enormen Defizite aus der Reagan-Ära abzubauen und die Steuern zu senken. Die Energie- und Telekommunikationsmärkte wurden dereguliert und zahlreiche Regulierungen des Banken- und Finanzsektors aufgehoben. Umso größer war die Ernüchterung zu Beginn des 21. Jahrhunderts, als die Aktienkurse fielen, spektakuläre Firmenpleiten auftraten und die amerikanische Wirtschaft in die Rezession glitt.

Mit dieser Zeit setzt sich Joseph Stiglitz, Wirtschaftswissenschaftler und ehemaliger Berater Clintons, in seinem Buch kritisch auseinander – wozu er wie kein anderer qualifiziert ist. Stiglitz ist einer der profiliertesten Wirtschaftstheoretiker der Gegenwart; für seine grundlegenden Arbeiten zur Bedeutung von Informationsasymmetrien erhielt er 2001 den Wirtschaftsnobelpreis (SdW 12/2001, S. 24). Als Regierungsberater und als Chefvolkswirt der Weltbank (1995–1999) kennt er zudem die Auseinandersetzungen um die Wirtschaftspolitik innerhalb der Regierung und der Zentralbank sowie die Versuche von Lobbyisten, auf die Gestaltung der Politik Einfluss zu nehmen.

Seiner Erfahrung nach lassen sich die Wirtschaftspolitiker von Glaubenssätzen leiten, die sie für wissenschaftlich begründet halten, die ihre Glaubwürdigkeit aber nur durch beständiges Weitererzählen gewonnen haben – Mythen eben. In Zeiten der Rezession soll man ein Defizit abbauen; Kriege kurbeln die Wirtschaft an; die Hochkonjunktur in den USA war das Werk der Wirtschaftsbosse; die »unsichtbare Hand« des Gründervaters der modernen Ökonomie, Adam Smith (1723–1790), verwandelt den Egoismus des Einzelnen in das Wohl aller; die Finanzmärkte sind allwissend; die Staatsbürokratie ist aufgebläht und stets ineffizient; der Kapitalismus amerikanischer Prägung ist für alle Staaten der Welt der beste Weg. Stiglitz unternimmt es, diese Mythen der Reihe nach zu entzaubern.

Irgendwann ist jeder Aufschwung zu Ende, denn er trägt schon die Keime des Abschwungs in sich. Dass aber der Aufschwung der 1990er Jahre und der darauf folgende Abschwung so extrem ausfielen, war wesentlich durch massive Steuersenkungen und den Defizitabbau sowie durch weit reichende Deregulierungen und eine einseitige Orientierung der Zentralbank an der Inflationsbekämpfung verursacht.

Wirtschaftspolitiker lassen sich von Mythen leiten

Der Boom der *roaring nineties* war eine klassische Blase, in der sich die Preise von Vermögensgegenständen völlig von ihrem realen Wert gelöst hatten. Für Unternehmen, die Gewinne weder erwirtschaftet hatten noch für die nahe Zukunft erwarten ließen, wurden Milliarden bezahlt. Die Politik und die Zentralbank taten nichts, diesen irrationalen Überschwang zu bremsen. Im Gegenteil, sie heizten durch Steuersenkungen für Reiche und einen Rückzug des Staats aus der Alterssicherung – der einen Bedarf nach privater Vorsorge erzeugte – den Aktienboom noch an. Die verbreitete Vorstellung, die neuen Technologien würden zu dauerhaften, großen Produktivitätsfortschritten führen, sowie eine viel zu starke Orientierung der Zentralbank an der Inflationsbekämpfung taten ein Übriges, die Blase aufzublähen und dann abrupt platzen zu lassen.

Beschleunigt wurde die Expansion der Blase durch problematische Buch- ▷

▷ führungsregeln und die Entlohnung der Manager durch Aktienoptionen. Dadurch bestimmte der Börsenwert eines Unternehmens wesentlich die Vorstandsgehälter, was einen Anreiz schaffte, kurzfristig hohe Gewinne zu erzielen, auch auf Kosten der langfristigen Erträge. Beides führte dazu, dass den Anlegern Informationen über die tatsächliche Lage der Unternehmen so lang wie möglich vorenthalten wurden.

Das spektakulärste Beispiel, über das Stiglitz in einem eigenen Kapitel ausführlich berichtet, ist der Konkurs des Energiekonzerns Enron. Das Unternehmen nutzte die Deregulierung des Energiemarkts und die Fortschritte der Informationstechnologien, um sich von einem Gasleitungsbetreiber in ein Online-Energiehandelsunternehmen zu verwandeln. Ein Teil des Geschäfts bestand darin, Gas und Strom heute zu verkaufen und zu einem späteren Zeitpunkt zu liefern. Entsprechend wurden die Einnahmen aus dem Verkauf sofort verbucht, die Ausgaben durch die Lieferung erst später, häufig erst im nächsten Geschäftsjahr. Auf diese – keineswegs illegale – Weise wurden in den Bilanzen zu hohe Gewinne ausgewiesen und die tatsächliche Lage des Unternehmens verschleiert. Der Autor führt weitere Beispiele dafür an, wie Deregulierung, problematische Buchführungsregeln und kurzfristige Gewinninteressen zu massiven Fehlinvestitionen und einer Entwertung von Ersparnissen und Vermögen beigetragen haben.

Stiglitz zeigt eindrucksvoll, dass ein Rückzug des Staats aus der Wirtschaft, umfassende Deregulierungen und eine Öffnung der Märkte keineswegs zwangsläufig zu einem langfristigen Wohlstand für die ganze Welt führen. Letztlich beruhen die Mythen alle auf einer Verkennung wissenschaftlicher Erkenntnisse. Das segensreiche Wirken der »unsichtbaren Hand« hängt von ganz bestimmten Bedingungen ab (was schon Adam Smith und die nachfolgenden Theoretiker erkannt hatten). Märkte können versagen, wenn zwischen Marktteilnehmern Informationsasymmetrien bestehen oder – wie für viele Umweltgüter – Eigentumsrechte nicht definiert sind. In diesen Fällen ist der Staat gefordert, durch sinnvolle Regulierungen zur Funktionsfähigkeit von Märkten beizutragen.

Am Ende seines Buchs stellt Stiglitz seinen Entwurf für die Ökonomie der Zukunft vor, den »Neuen Demokratischen Idealismus«. Wie viele Zukunftsvisionen enthält er keine Patentrezepte, liefert aber wichtige Denkanstöße.

Die wichtigste Forderung an den Staat ist, sowohl auf lokaler wie auf globaler Ebene soziale Gerechtigkeit herzustellen. Ein zentrales Thema ist in diesem Zusammenhang das Verhältnis von Individuum und Gesellschaft, dem Stiglitz einen eigenen Abschnitt widmet. Mit diesen Ausführungen liefert er fundamentale Erklärungen für die Probleme moderner Wirtschaftssysteme.

Für Stiglitz ist die Behauptung, »dass die Einzelnen durch Verfolgung ihres Eigeninteresses dem Gemeinwohl dienen …, eine bemerkenswerte Auffassung, die es einem erlaubt, zwei Fliegen mit einer Klappe zu schlagen«. Und er schreibt weiter: »Wäre dies grundsätzlich wahr, dann wäre die Ethik ihrer Substanz beraubt. Wir brauchten nicht zu fragen: Wie handeln wir (moralisch) richtig? Wir brauchten nur zu fragen: Was wollen wir tun? Was macht uns glücklicher?«

»Was wollen wir tun?« ist die falsche Frage

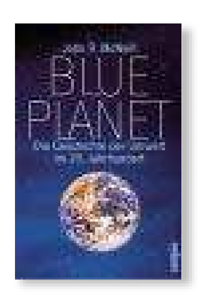
Die Geschichte der *roaring nineties* zeigt, dass die Erkenntnisse der Wissenschaftler bei Wirtschaftspolitikern und Unternehmern nur allzu gerne missverstanden oder ignoriert werden. Für eine stabile wirtschaftliche Entwicklung, die zu einem fairen Ausgleich aller Interessen führt, reicht es letztlich doch nicht aus, dass alle sich nur an ihren individuellen Vorteilen orientieren.

Stiglitz' Buch ist eine Mahnung an die Politik, den Staat nicht seiner Handlungsfähigkeit zu berauben und das Ziel der sozialen Gerechtigkeit nicht aus den Augen zu verlieren. Es ist auch eine Mahnung an die moderne Ökonomik und die Wirtschaftsethik, selbst wenn Stiglitz das nicht explizit so formuliert. Denn anscheinend nutzt die Gesellschaft das Modell der »unsichtbaren Hand«, um sich vorschnell von der Last der Suche nach dem richtigen Handeln zu befreien.

Diese bemerkenswerte Analyse liefert jedenfalls viel Stoff zum Nachdenken und zur Selbstkritik für Politiker, Manager, aber auch für Wirtschaftswissenschaftler.

Frank Jöst

Der Rezensent ist Privatdozent am Alfred-Weber-Institut für Sozial- und Staatswissenschaften der Universität Heidelberg.



ÖKOLOGIE

John R. McNeill

Blue Planet

Die Geschichte der Umwelt im 20. Jahrhundert

Aus dem Englischen von Frank Elstner.
Campus, Frankfurt am Main 2003. 496 Seiten, € 29,90

Es gibt doch etwas Neues unter der Sonne (»Something New under the Sun« ist der englische Originaltitel). Noch nie zuvor hat der Mensch die Ökosysteme der Erde in einem solchen Ausmaß, mit solcher Intensität und in einer derartigen Geschwindigkeit beeinflusst. Smog und Bodenerosion, die Überfischung der Meere, der Treibhauseffekt und das Ozonloch sind nur die bekanntesten aus einer langen Reihe lokaler und globaler Umweltprobleme. Wir erleben einen riskanten Umbruch in der Entwicklungsgeschichte der Menschheit.

John R. McNeill, Professor für Geschichte an der Georgetown University in Washington und Autor weiterer Arbeiten über ökologische Veränderung, rekonstruiert – faktenreich und vielfach belegt – den menschengemachten weltweiten Wandel der natürlichen Umwelt und dessen Folgen. Mit zahlreichen Ergebnissen aus der Umweltforschung und der Erinnerung an ökologische Katastrophen wie das schon wieder in Vergessenheit geratene Waldsterben gelingt ihm eine fast lückenlose Zusammenstellung der Umweltgeschichte, die durch Zerstörung, Übernutzung und Raubbau geprägt zu sein scheint.

Die beiden wesentlichsten Ursachen der weltweiten Umweltproblematik sind unbestritten die Zunahme der Weltbevölkerung und die etwa Mitte des 18. Jahrhunderts einsetzende Industrialisierung mit einem enormen Verbrauch fossiler Energieträger. Zugleich nahm durch die Erzeugung fester, flüssiger und gasförmiger Abfallstoffe die Verschmutzung von Boden, Wasser und Luft zu.

Im Anstieg des Energieverbrauchs kann sich kein Jahrhundert mit dem 20. messen – und auch kein Jahrtausend. Zugleich verschwanden Hungersnöte und Seuchen, und die industrielle Produktion brachte weiten Teilen der Menschheit ein Ende der Armut – zumindest in der Ersten Welt.

Bevölkerungswachstum und Urbanisierung zählen zu den bedeutsamsten Motoren des ökologischen Wandels. Damit einher gehen die Erschließung neuer Energiequellen, die Entwicklung neuer Technologien und die weltweite Verknüpfung der Märkte. Massenpro- ▷



New York war 1949 noch eine kohlebeheizte Stadt mit Tausenden von Schornsteinen (Blick vom Empire State Building südwestwärts).

duktion und Massenkonsum eskalieren und zerstören damit an vielen Stellen das ökologische Gleichgewicht, dessen Erhaltung Ökobewegung und Umweltpolitik seit langem mit Losungen wie »Global denken – lokal handeln« anmahnen.

Die im 20. Jahrhundert massiv ausgeweitete Anzapfung von Ressourcen wie Wasser und Brennstoff wird in absehbarer Zeit zu einer Verknappung führen. Trotzdem beherrschen weiter Wachstumsideologien die Politik, nicht erst neuerdings gepaart mit großen Sicherheitsängsten. Der Globalisierung werden Mensch und Natur in nie dagewesener Weise untergeordnet werden.

McNeill lässt ein ganz neues und umfassenderes Bild der Umweltveränderungen in ihrem jeweiligen historischen Kontext entstehen. Bemerkenswert ist die von ihm immer wieder neu formulierte Korrelation zwischen Natur- und Menschheitsgeschichte, die erst in ihrem wechselseitigen Zusammenspiel vollständig begriffen werden können.

Der Autor agiert dabei weit gehend emotionslos und unterlässt es, den moralischen Zeigefinger zu erheben. Stattdessen soll der Leser selbst die benannten Veränderungen als Verbesserung oder Verschlechterung werten. Dies ist aus der Sicht eines Historikers sicherlich legitim, aber eine Zumutung für einen umweltbewegten Menschen, der zwar weder die simple Moral mag noch die starke Vereinfachung liebt, aber für eine gewisse Wegweisung dennoch dankbar gewesen wäre.

Trotz der eindrucksvollen Schilderung der Bedrohung ist McNeill weder Gegner des technischen Fortschritts noch dogmatischer Umweltschützer, der den Lauf der Geschichte zurückdrehen will. Im »verschwenderischen« 20. Jahrhundert hat jedoch nach seiner Auffassung die Gattung Mensch begonnen, mit der Welt zu spielen, ohne die Regeln zu kennen. Unabsichtlich hat sie auf der Erde ein gigantisches, unkontrolliertes Experiment gestartet.

Meine pessimistische Prognose lautet: Auch zukünftig wird die Ökonomie den absoluten Vorrang vor der Ökologie haben. Zynisch optimistisch betrachtet bedeutet dies aber: Das Experiment geht – wenigstens noch eine Zeit lang – weiter.

Susanne Hufmann

Die Rezensentin ist Biologin und arbeitet bei der Hessischen Gesellschaft für Ornithologie und Naturschutz in Rodenbach.

PREISRÄTSEL

Chancengleichheit

Von Paul von der Heyde

Miraculus, der Magier, späht vor seinem Auftritt durch den Vorhang: Der Saal mit seinen 2000 Plätzen ist zu über 95 % besetzt; dabei sind die Damen in der Mehrheit. Wie immer wird er zwei zufällig aus dem Publikum ausgewählte Personen als Assistenten auf die Bühne bitten. Am liebsten wären ihm eine Dame und ein Herr. Tatsächlich wird dieses Ereignis mit einer Wahrscheinlichkeit von genau 50 % eintreten.

Aus wie vielen Damen und Herren setzt sich das Publikum zusammen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf »Wendekreisel«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. September 2004, eingehen.

Lösung zu »Leitern« (Juli 2004)

Die Höhe *h* des Schnittpunkts der Leitern muss für gegebene Leiterlängen a und b zwischen 0 und $(a{\cdot}b)/(a+b)$ liegen. Für die speziellen Werte $a=119$ und $b=70$ ist der gesuchte Wert $h=30$.

Karl-Friedrich Kürten aus Waldkirch fand über die Strahlensätze die Verhältnisse $x/h=a/m$ und $x/n=(a-x)/m$ (Skizze rechts), aus denen sich

(1) $\quad 1/h=1/m+1/n$

ergibt. Aus dem Satz des Pythagoras für die Dreiecke ABM und ABN folgt

(2) $\quad m^2+d^2=a^2$ und $n^2+d^2=b^2$.

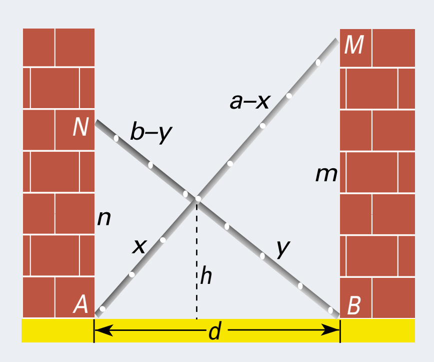
Eliminiert man d, so ergibt sich

(3) $\quad m^2-n^2=a^2-b^2$

(a sei die größere der beiden Leiterlängen). Löst man die Gleichungen (2) nach m beziehungsweise n auf und setzt sie in (1) ein, so folgt

(4) $$\frac{1}{h}=\frac{1}{\sqrt{a^2-d^2}}+\frac{1}{\sqrt{b^2-d^2}}\ .$$

Die Funktion $1/h$ in Abhängigkeit von d ist für $0<d<b$ stetig und wächst monoton. Strebt d gegen 0, so wird $h=(a{\cdot}b)/(a+b)$. Für $d\to b$ strebt $h\to 0$.



Den gesuchten ganzzahligen Wert für *h* kann man folgendermaßen finden:

Mit $a=119$ und $b=70$ folgt aus Gleichung (3): $m^2-n^2=9261$ oder in Faktoren zerlegt $(m+n){\cdot}(m-n)=3^3{\cdot}7^3$. Außerdem muss gelten: $m<a=119$, $n<b=70$ und $m>n$.

$(m+n)$ muss also ein Teiler von $3^3{\cdot}7^3$ sein, kleiner als $119+70=189$, aber größer als $\sqrt{9261}=96{,}2\ldots$

Damit gibt es noch genau eine Lösung, nämlich $m+n=147$ und $m-n=63$. Daraus ergeben sich $m=105$, $n=42$, $h=30$ und $d=56$.

Die Gewinner der fünf Prepaidkarten »Holiday« sind Harald Lermen, Tholey; Günther Zerweck, Korntal; Gerhard Lohe, Düsseldorf; Gerhard Batz, Taunusstein; und Thomas Schirmer, Darmstadt.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Die Getriebe des Teufels

Unendlich viele ineinander greifende Zahnräder können sich synchron drehen, wenn sie richtig angeordnet sind. Das gleiche Kunststück funktioniert auch für Kugeln.

Von Christoph Pöppe

Manchmal bleibt ein eigentlich angesagtes Erdbeben einfach aus – nicht unbedingt ein Anlass zu großer Trauer, aber doch zum Nachdenken. Tief unter der Erdoberfläche schieben sich zwei tektonische Platten aneinander entlang, verhaken sich gelegentlich, weil ihre Ränder nicht besonders glatt sind; im weiteren Verlauf der Bewegung baut sich allmählich Spannung auf, die sich irgendwann ruckartig entlädt. Diese Theorie passt zu den Beobachtungen; nur dass es entlang einer solchen Plattengrenze auch lange Abschnitte gibt, in denen die Erde nie bebt, will nicht einleuchten.

Steckt dort zwischen den großen Platten vielleicht ein Kugellager, das die Reibung zwischen ihnen auf erträgliche Werte mindert? Nicht wirklich. Es ist zwar denkbar, dass von beiden Platten allerlei Brocken abbrechen und auf die Dauer zu einer Schicht annähernd kugelförmiger Steine zurechtgeschmirgelt werden. Eine einzige Schicht von Kugeln einer einheitlichen Größe kann dabei nicht zu Stande kommen. Eher ist es ein buntes Gemisch von den dicksten Klumpen bis zu den feinsten Sandkörnern – Geröll eben. Aber warum sollte das Geröll rollen, statt nur zu knirschen?

Hans Herrmann, Physiker an der Universität Stuttgart, hat eine mathematische Idealisierung dieser Frage untersucht. Gibt es eine raumfüllende Anordnung von Kugeln verschiedenster Größe, die reibungsfrei aufeinander abrollen? Die entscheidende Bedingung dabei ist die Eigenschaft »raumfüllend«; denn wenn Hohlräume zugelassen sind, ist die Aufgabe nicht mehr schwer. Man setze zum Beispiel vier Kugeln an die Ecken eines Quadrats und lasse sie abwechselnd rechts- oder linksherum rotieren. Die Anordnung lässt sich in die ganze Ebene fortsetzen und sogar senkrecht zu dieser Ebene, indem man jede Kugel durch eine starr rotierende Säule aus Kugeln ersetzt. Aber das ganze Gerolle ist offensichtlich kein Geröll, weil es unter Druck von außen auf der Stelle zusammenbrechen würde. Das Loch zwischen den vier Kugeln muss also durch mindestens eine weitere Kugel aufgefüllt werden; zwischen der neuen Kugel und den alten bleiben wieder kleinere Löcher, die ihrerseits aufgefüllt werden wollen, und so weiter. Am Ende enthält die Anordnung, die wir suchen, unendlich viele Kugeln, die beliebig klein werden: eine der Strukturen, die Benoît Mandelbrot unter dem Namen »Fraktale« bekannt und populär gemacht hat.

Und es existiert tatsächlich, dieses fraktale Kugellager (Bild rechts oben). Es ist allerdings nicht ganz einfach zu finden. Zur Einstimmung denken wir zunächst über die einfachere, zweidimensionale Version des Problems nach: Gibt es flächenfüllende Anordnungen von Zahnrädern, die ineinander greifen und rotieren können, ohne sich gegenseitig zu beklemmen? Es gibt sie. In einer frühen Veröffentlichung über Fraktale – die ich leider nicht mehr wiederfinde – wurde eine solche Anordnung als »das Getriebe des Teufels« *(devil's gearbox)* bezeichnet.

HANS J. HERRMANN

Klassische apollonische Kreispackung mit drei gleich großen Kreisen plus dem einhüllenden Kreis als Ausgangskonfiguration. Alle Kreise der Packung entstehen durch wiederholte Spiegelung an den vier gestrichelt eingezeichneten Inversionskreisen.

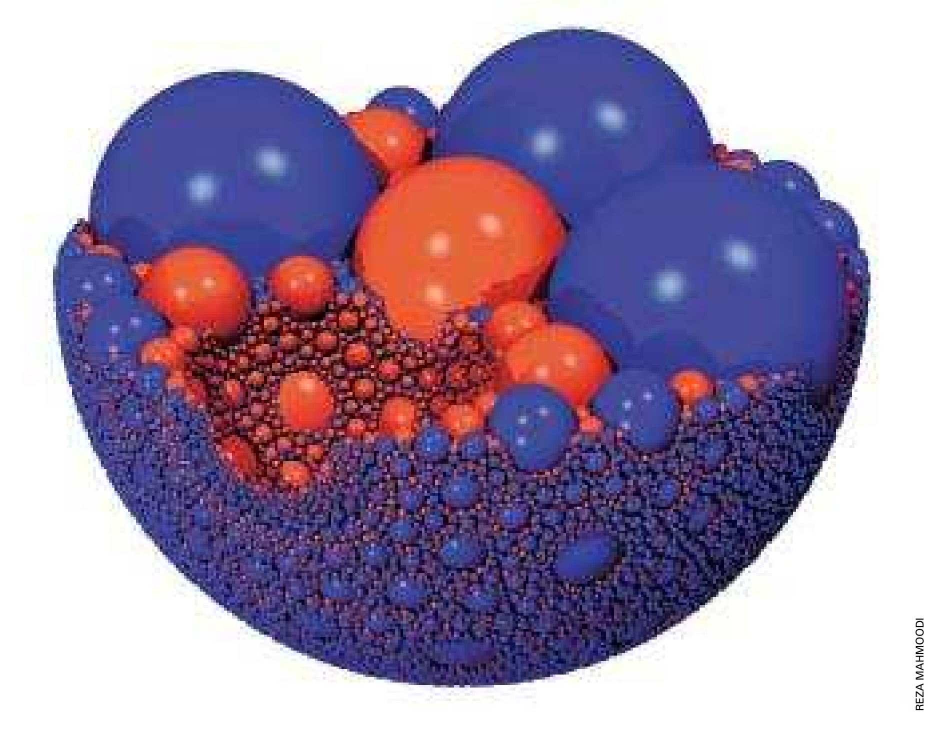
Hans Herrmann und andere haben sich über dieses Problem schon vor mehr als zehn Jahren Gedanken gemacht, und ein Grieche namens Apollonius von Perge (etwa 262 – 190 v. Chr.) noch deutlich früher. Apollonius löste nämlich die Aufgabe, einen Kreis zu finden, der drei gegebene Kreise berührt. Dieses Ergebnis nutzend, fanden in jüngerer Zeit Allan R. Wilks und andere die »apollonischen Kreispackungen«: Anordnungen unendlich vieler einander berührender Kreise innerhalb eines großen Kreises (Bild links unten; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 116).

Wie macht man aus einer Anordnung weniger einander berührender Kreise unendlich viele mit derselben Eigenschaft? Das ist erstaunlicherweise nicht besonders schwierig. Man setzt die ursprüngliche Anordnung in ein Spiegelkabinett und sieht nicht nur die wenigen ursprünglichen Kreise, sondern deren Spiegelbilder, die Spiegelbilder dieser Spiegelbilder und so weiter. Es handelt sich allerdings nicht um gewöhnliche Spiegel, sondern gewissermaßen um kreisförmige: Die vervielfältigende Abbildung ist die so genannte Inversion am Kreis (Kasten S. 108).

Apollonische Kreispackungen

Dabei kommt es nicht entscheidend darauf an, ob die unendlich vielen Kreise in einem großen Kreis liegen oder zwischen zwei parallelen Geraden, wie es dem Geröllproblem eher entsprechen würde. Denn eine weitere Inversion an einem geeigneten Kreis macht aus zwei ineinander liegenden Kreisen, die sich in einem Punkt genau berühren, zwei parallele Geraden – oder umgekehrt: Alle Kreise, die zwischen den Geraden lagen, müssen sich im Inversionsbild, entsprechend verkleinert, in den Zwickel zwischen den Kreisen drängen (siehe auch das Titelbild zum Spezial-Heft 4/2003 »Omega« von Spektrum der Wissenschaft).

Die apollonischen Kreispackungen von Wilks und seinen Kollegen haben nur einen Nachteil: Sie beginnen stets mit drei Kreisen, deren jeder die beiden anderen berührt (Bild links). Drei Zahnräder aber, deren jedes in die beiden anderen eingreift, können sich offensichtlich nicht rühren. Das geht den Spiegelbildern der Zahnräder nicht anders, sodass der Übergang zur vollständigen apollonischen Packung das Problem nur verschärft.



REZA MAHMOODI

◀ In dieser apollonischen Kugelpackung berührt nirgends eine Kugel eine andere gleicher Farbe. Also können die roten Kugeln in einer beliebigen einheitlichen Richtung rotieren und die blauen mit dazu paralleler Drehachse im umgekehrten Drehsinn – alles reibungsfrei!

Hans Herrmann und seine Kollegen mussten also mit Anordnungen beginnen, in denen mindestens vier Kreise einen »Ring« bilden, so wie oben die Kugeln im Karree. Allgemeiner muss in der fertigen Anordnung jeder Weg von Kreis zu benachbartem Kreis und so weiter bis zurück zum Ausgangskreis eine gerade Anzahl von Stationen haben. Nur dann können die Kreise auf diesem Rundweg, aneinander abrollend, abwechselnd links- und rechtsherum rotieren.

Eine geeignete Ausgangskonfiguration würde also zum Beispiel aus vier (sechs, acht, …) Kreisen bestehen, die ihre Mittelpunkte auf den Ecken eines Quadrats (regelmäßigen Sechsecks, Achtecks, …) haben und so groß sind, dass sie sich gerade gegenseitig berühren. Der alle umhüllende Kreis vervollständigt das Ensemble (Bild rechts).

Passend zu dieser Konfiguration sind nun die Inversionskreise (die »Spiegel«) zu platzieren, und zwar nach folgendem Rezept: Jeder Inversionskreis soll senkrecht auf allen Kreisen stehen, die er schneidet, und die Inversionskreise sollen sich möglichst berühren, aber auf keinen Fall überlappen.

Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, lässt sich die apollonische Packung elegant per Computerprogramm herstellen: Jeder Inversionskreis arbeitet nur von außen nach innen. Das heißt, zu einem Kreis, der gänzlich außerhalb des Inversionskreises liegt, wird das Spiegelbild berechnet; das liegt ganz im Inneren des Inversionskreises und ist stets kleiner als das Urbild. Ein Kreis, der den Inversionskreis senkrecht schneidet, würde auf sich selbst abgebildet und bleibt daher unberücksichtigt, und ein Kreis, der im Inneren des Inversionskreises liegt, ist nach Konstruktion bereits Spiegelbild eines äußeren Kreises; ihn wieder nach außen zu spiegeln würde also nichts Neues bringen.

Geordnete Füllung

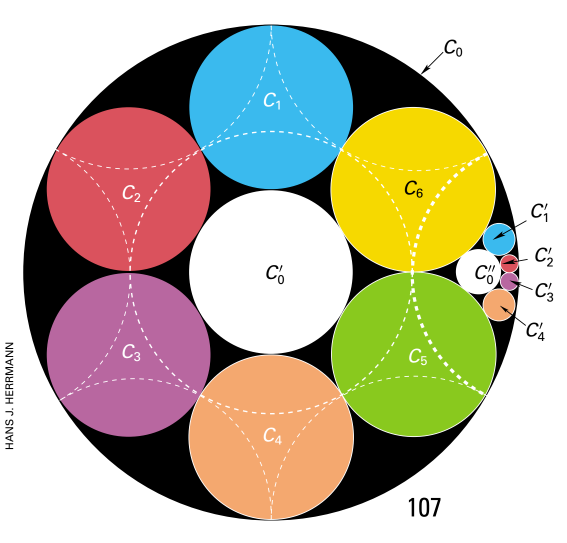
Aus einer Liste von Kreisen – zum Beispiel der Ausgangskonfiguration – macht also das Computerprogramm eine neue Liste, indem es zu jedem Inversionskreis und zu jedem Kreis, der außerhalb des Inversionskreises liegt, das innere Spiegelbild berechnet. Alle Listen zusammen ergeben am Ende die Packung; natürlich hört das Programm auf zu arbeiten, sowie die Größe der Kreise eine gewisse (Sichtbarkeits-)Grenze unterschreitet.

Jeder Kreis hat sein persönliches »Revier«, nämlich sein Inneres, in das außer ihm selbst niemand hineinspiegelt. Deswegen geht es auch in der gesamten Packung sehr geordnet zu: Da die Ausgangskreise sich nicht überschneiden und wegen der Reviereinteilung keine neuen Überschneidungen zu Stande kommen, besteht die gesamte Packung aus lauter einander berührenden, aber nicht überlappenden Kreisen. Das gilt auch für Herrmanns ursprüngliche »Rollenlager« zwischen zwei Geraden, die auf anderem Wege konstruiert sind.

Wenn aber die Inversionskreise sich überlappen? Dann geraten sie auf der gemeinsamen Teilfläche zueinander in Konkurrenz. Es kann sogar ein und derselbe Kreis zwei einander überschneidende Bilder in der gemeinsamen Zone haben, wobei die jeweils letzte in der Kette der Kreisspiegelungen das eine Mal dem einen, das andere Mal dem anderen Inversionskreis zu verdanken ist.

Die Geometrie dieser wiederholten Spiegelungen wird sehr unübersichtlich; aber Hans Herrmann und sein Koautor Reza Mahmoodi Baram schaffen Klarheit durch einen eleganten Trick: Sie wenden auf die ganze Konfiguration eine weitere Inversion an. Deren Inversionskreis hat zum Mittelpunkt einen der Schnittpunkte der konkurrierenden Inversionskreise. Dadurch verwandeln sich diese beiden Inversionskreise in Geraden, und aus einer Inversion an einem dieser Kreise wird eine gewöhnliche Spiegelung an der entsprechenden Geraden.

Und für ebene Spiegel wissen wir, wie überlappende Bilder zu vermeiden sind: Der Winkel zwischen den Spiegeln muss ein glatter Teiler von 180 Grad sein (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. ▷



HANS J. HERRMANN

▶ Sechs Kreise C_1 bis C_6 an den Ecken eines Sechsecks, dazu der umhüllende Kreis C_0, sind die Ausgangskonfiguration einer apollonischen Kreispackung. Die gestrichelten Kreise sind die Inversionskreise. Der zentrale Kreis C_0' ist das Inversionsbild von C_0 bezüglich des zentralen Inversionskreises. Außerdem sind die Bilder der Urkonfiguration bezüglich des fett gestrichelten Inversionskreises eingezeichnet.

102). Das liefert das Rezept für die Konstruktion der Inversionskreise: Sie müssen sich in den richtigen Winkeln schneiden. Dann liegen die auf verschiedenen Wegen erzeugten Bilder der Urkreise genau aufeinander, und der Computer muss nur die überzähligen aussortieren, bevor er die entsprechenden Kreise und alle ihre folgenden Inversionsbilder doppelt berechnet.

Wodurch können überlappende Inversionskreise überhaupt auftreten? In der Konstruktion mit dem regelmäßigen Vieleck zum Beispiel dadurch, dass man die Kreise um die Ecken des Vielecks zu klein macht, sodass sie einander nicht mehr berühren (wohl aber noch den Außenkreis). Daraufhin muss der zentrale Inversionskreis entsprechend vergrößert werden, sodass er mit seinesgleichen überlappt. Wenn man also die Urkreise zu klein wählt, dann nicht irgendwie, sondern nur genau im richtigen Maße zu klein; sonst kommt keine apollonische Packung zu Stande.


REZA MAHMOODI

Diese Überlegungen werden besonders interessant, wenn man von flächigen Kreispackungen zu räumlichen Kugelpackungen übergeht. Unser Universalwerkzeug, die Inversion, ist nicht auf zwei Dimensionen beschränkt. Die Inversion an der Kugel gehorcht den analogen Gesetzen wie ihre »flache« (zweidimensionale) kleine Schwester. Insbesondere bildet sie Kugeln und Ebenen auf Kugeln und Ebenen ab. Dabei kommt es wieder darauf an, ob die abzubildende Kugel durch den Mittelpunkt der Inversionskugel geht oder nicht.

Das oben dargestellte Rezept für die Herstellung einer apollonischen Kreispackung wäre ungefähr wie folgt auf apollonische Kugelpackungen zu übertragen:

Die Inversion am Kreis

Eine Fliege, die im Inneren einer blank polierten Konservendose sitzt, sieht in diesem »Hohlspiegel« sich selbst umso größer und weiter entfernt, je näher sie selbst sich dem Mittelpunkt des spiegelnden Kreises ist. Die mathematisch definierte Inversion am Kreis, auch »Kreisspiegelung« genannt, ist zwar nicht dasselbe wie die physikalische Spiegelung, hat aber mit ihr einige wesentliche Eigenschaften gemein. So ist auch bei der Inversion das Spiegelbild vom Spiegelbild wieder gleich dem Urbild.

Im Prinzip darf der Inversionskreis (die »Konservendose«) irgendwo in der Ebene sitzen. Wenn man es sich aussuchen kann, gibt man dem Kreis den Radius 1 und verlegt seinen Mittelpunkt in den Ursprung des Koordinatensystems (»Einheitskreis«), weil dann die Berechnungen am einfachsten sind.

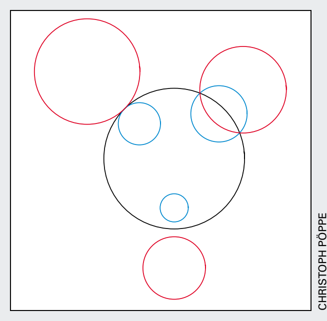
Im allgemeinen Fall habe der Inversionskreis den Mittelpunkt M und den Radius r. Dann liegt zu einem beliebigen Punkt x der Bildpunkt x' in derselben Richtung wie x, von M aus gesehen, und das Produkt der Entfernungen von x und x', jeweils zum Mittelpunkt M, ist gleich r^2.

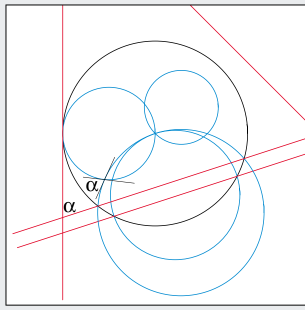
Punkte im Inneren des Inversionskreises werden ins Äußere abgebildet und umgekehrt. Punkte auf dem Inversionskreis gehen in sich selbst über. Der Mittelpunkt des Inversionskreises wird ins Unendliche abgebildet und umgekehrt.

In den Bildern ist der Inversionskreis schwarz gezeichnet, der Kreis, der abgebildet wird, blau und sein Bild unter der Inversion rot. Man darf auch das Rote als das Urbild auffassen und das Blaue als das Bild.

Eine Inversion macht aus Kreisen und Geraden Kreise und Geraden. Im Einzelnen:

- Ein Kreis, der nicht durch den Mittelpunkt M des Inversionskreises geht, wird wieder auf einen Kreis abgebildet. Wenn er den Inversionskreis schneidet, tut das auch sein Bild, und zwar in denselben Punkten, denn die Punkte des Inversionskreises bleiben unter der Inversion unverändert.
- Ein Kreis, der durch M geht, wird auf eine Gerade abgebildet, die nicht durch M geht, und umgekehrt. Eine Gerade lässt sich in diesem Zusammenhang sinnvoll auffassen als ein Kreis mit unendlich großem Radius, der dementsprechend durch den unendlich fernen Punkt geht.
- Eine Gerade, die durch M geht, wird auf sich selbst abgebildet.





CHRISTOPH PÖPPE

Die Inversion ist winkeltreu. Zwei Geraden (oder Kreise), die sich unter einem Winkel α schneiden, werden auf zwei Kreise (oder Geraden) abgebildet, die sich unter demselben Winkel α schneiden. (Der Winkel zwischen gekrümmten Linien ist der Winkel zwischen ihren Tangenten im Schnittpunkt.) Das Bild eines Kreises, der den Inversionskreis rechtwinklig schneidet, muss ebenfalls den Inversionskreis rechtwinklig schneiden und deswegen schon dem ursprünglichen Kreis gleich sein. Zwei parallele Geraden werden auf Kreise abgebildet, die sich im Mittelpunkt des Inversionskreises unter dem Winkel null schneiden, das heißt tangential zueinander sind.

Diese Kugelpackung beginnt mit zwanzig Kugeln an den Ecken eines Dodekaeders plus einer großen im Zentrum und entsprechend gewählten Inversionskugeln. Links ein frühes Stadium der Füllung, rechts die »untere Hälfte« der vollendeten Packung. Die Kugeln sind mit vier Farben so eingefärbt, dass nirgends zwei gleichfarbige Kugeln aneinander stoßen.

Im ersten Schritt setze man die Urkugeln an die Ecken eines regelmäßigen »Vielecks«. Davon gibt es in drei Dimensionen nicht allzu viel Auswahl. Es muss schon einer der fünf platonischen Körper sein: Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Dodekaeder und Ikosaeder. Die oben erwähnten vier Kugeln im Karree sind schon ein guter Anfang: Man muss nur noch eine Kugel von oben in das Loch in der Mitte des Quadrats setzen und eine von unten, und fertig ist die Besetzung des Oktaeders.

Ungehemmt rotierende Kugellager

Wenn sich allerdings diese sechs Kugeln berühren, dann ist die Anordnung bereits verklemmt, denn es gibt lauter Gruppen von drei Kugeln, deren jede die beiden anderen berührt. Wie könnte es auch anders sein; das Oktaeder besteht ja aus acht Dreiecksflächen. Also muss man die Kugeln verkleinern, um sie auseinander zu halten.

Im zweiten Schritt setze man die Inversionskugeln so, dass sie die Urkugeln rechtwinklig durchdringen und einander allenfalls in einem der zulässigen Winkel schneiden, sprich einem glatten Teiler von 180 Grad. (Der Winkel zwischen zwei sich schneidenden Kugeln ist der Winkel zwischen ihren Tangentialebenen im Schnittpunkt.) Dass die Inversionskugeln sich nur berühren, ist bei den platonischen Körpern nicht erreichbar.

Wie im zweidimensionalen Fall gibt es eine zentrale Inversionskugel, die in dem Maße anwächst, wie die Urkugeln verkleinert werden, sowie in der Größe unveränderliche äußere Inversionskugeln, die »zwischen« den Urkugeln liegen. Bei einem platonischen Körper liegen die Mittelpunkte der äußeren Inversionskugeln auf den Ecken des dualen platonischen Körpers. (Würfel und Oktaeder sind dual zueinander, desgleichen Dodekaeder und Ikosaeder; das Tetraeder ist dual zu sich selbst.) Dadurch ergibt es sich, dass der Winkel zwischen den äußeren Inversionskreisen in den meisten Fällen einen der zulässigen Werte hat, nämlich immer dann, wenn der duale Körper aus gleichseitigen Dreiecken oder Quadraten besteht. Nur zum Ikosaeder gibt es keine apollonische Kugelpackung, weil dessen Duales, das Dodekaeder, von Fünfecken begrenzt ist. Der sich ergebende Winkel 72 Grad passt nicht glatt in die 180 Grad hinein.

Dafür gibt es zum Oktaeder, je nach Verkleinerung der Urkugeln, zwei wesentlich verschiedene Packungen. Eine von ihnen ist tatsächlich zweifarbig (Bild S. 107 oben), das heißt, man kann die Kugeln mit nur zwei Farben so einfärben, dass nirgends zwei gleichfarbige Kugeln sich berühren. Diese Kugeln können völlig unverklemmt in jeder Richtung rotieren – vorausgesetzt, alle roten Kugeln drehen sich in eine Richtung und alle blauen genau in die Gegenrichtung.

Das ist alles sehr beeindruckend. Aber auch Hans Herrmann glaubt nicht ernsthaft, dass tief unter der Erde Kaliforniens eine oktaedrisch-apollonische Packung von Wackersteinen die Gesteinsplatten am Rumpeln hindert. Der Wert dieser Arbeit für die Anwendungen liegt eher in dem Nachweis, dass ein »Kugellager des Teufels« überhaupt möglich ist. Weitere Forschungen mögen die geschlagene Bresche erweitern und noch mehr Anordnungen mit dieser Eigenschaft finden – nicht ganz so regelmäßig vielleicht, dafür aber realistischer. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Die fraktale Geometrie der Natur. Von Benoît Mandelbrot. Birkhäuser, Basel 1991

Space-filling bearings in three dimensions. Von R. Mahmoodi Baram, Hans J. Herrmann und N. Rivier, in: Physical Review Letters, Bd. 92, S. 044301, 2004

Precise determination of the fractal dimensions of Apollonian packing and space-filling bearings. Von S. S. Manna und H. J. Herrmann, in: Journal of Physics A, Bd. 24, S. L481, 1991

Space-filling bearings. Von H. J. Herrmann, G. Mantica und D. Bessis, in: Physical Review Letters, Bd. 26, S. 3223, 1990

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

NEUROWISSENSCHAFTEN

Mensch auf Abwegen

Wird es uns etwas ausmachen, wenn die Biologie auszumachen vermag, was jeden von uns ausmacht?

Von Robert M. Sapolsky

Ein winziger Defekt in unserer DNA kann unsere ganze Persönlichkeit umkrempeln, uns sogar straffällig werden lassen.

Verdrehte Welt. Nehmen wir zum Beispiel Chuck und Arthur. Chuck arbeitet im Marketing. Als Mensch, der aus sich herausgeht und viel Ausstrahlung besitzt, bringt er jede Party mit seiner lockeren, aber seichten Art in Schwung. Er hält sich für unwiderstehlich, macht jeder Frau schöne Augen und hat in seiner nun dritten Ehe immer noch Probleme mit der Treue.



JOHN RITTER

Arthur dagegen arbeitet in der Buchhaltung. Er verhält sich zwanghaft, ist auf strenge moralische Maßstäbe festgelegt und zuverlässig in der Arbeit bis zu dem Grad, sich von seinen Kollegen ausbeuten zu lassen. Er lebt allein und verbringt die Abende mit dem Bau von Schiffsmodellen.

Besuchen wir die beiden Männer aber nur wenig später erneut, zeigen sie erstaunliche Persönlichkeits- und Verhaltensänderungen. Chuck hat sich ganz unerwartet zurückgezogen, verbringt mehr Zeit alleine. Aus heiterem Himmel hat er eine Leidenschaft fürs Malen entwickelt. Jeden freien Augenblick pinselt er düstere, bedrückende Bilder auf die Leinwand. Im Gespräch verfällt er oft in längeres Schweigen, sodass seinen Kunden unbehaglich zu Mute wird. Dieser Persönlichkeitszug wird sich verschlimmern und ihn in ein paar Monaten seinen Job kosten.

Arthur unterdessen erzählt seinen Kollegen neuerdings schmutzige Witze. Wirkte diese Eigenheit anfangs unterhaltsam, wenn auch rätselhaft, so gleiten die Witze inzwischen ins Obszöne und Unangemessene ab. Am vergangenen Wochenende ertappten ihn seine Verwandten bei einem Familientreffen sehr zu ihrer Bestürzung, wie er am Ohr seines noch in den Windeln liegenden Neffen saugte. Er streift jetzt abends durch die Straßen und steigt attraktiven Frauen nach. In einem Monat wird er sich vor einer sogar entblößen, was nur den ersten von vielen Konflikten mit dem Gesetz nach sich zieht.

Binnen weniger Jahre werden beide Männer in einer psychiatrischen Einrichtung landen.

Etwas Außergewöhnliches geht in ihrem Kopf vor. Beide Männer leiden nicht an einer psychischen Störung, sondern an einer neuro-

logischen. Ihre komplexen, bizarren Verhaltensänderungen beruhen auf einer Veränderung eines einzigen Gens – und zwar auf ein und derselben Mutation. Sie ruft eine als Frontotemporal-Demenz bezeichnete Störung hervor, die auch als Pick'sche Krankheit bekannt ist.

Was bedeutet es für uns und unser Miteinander, dass das Gehirn auf derart rätselhafte Abwege geraten kann? Welche Konsequenzen hat es, wenn wir mehr und mehr solcher Störungen beziehungsweise ihre Ursachen benennen, diagnostizieren und verstehen können?

Die Neurowissenschaften haben geradezu rasante Fortschritte gemacht. Wir verstehen heute schon vieles:

- wie Neuronen sich im Verlauf ihrer Entwicklung finden und miteinander verschalten,
- wie sie nach Verletzungen Selbstmord begehen,
- wie das Gehirn sensorische Informationen entschlüsselt und Muskelbewegungen koordiniert,
- wie Lebewesen lernen, etwa eine Meeresschnecke oder gar ein Mensch.

Das Aufregendste ist jedoch vielleicht, dass wir dabei sind, die neuralen Grundlagen unseres Verhaltens aufzudecken – sei es normal, abnorm oder irgendwo dazwischen. Kurzum: Wir erkunden gegenwärtig in der neurobiologischen Landschaft, was uns zum Menschen macht.

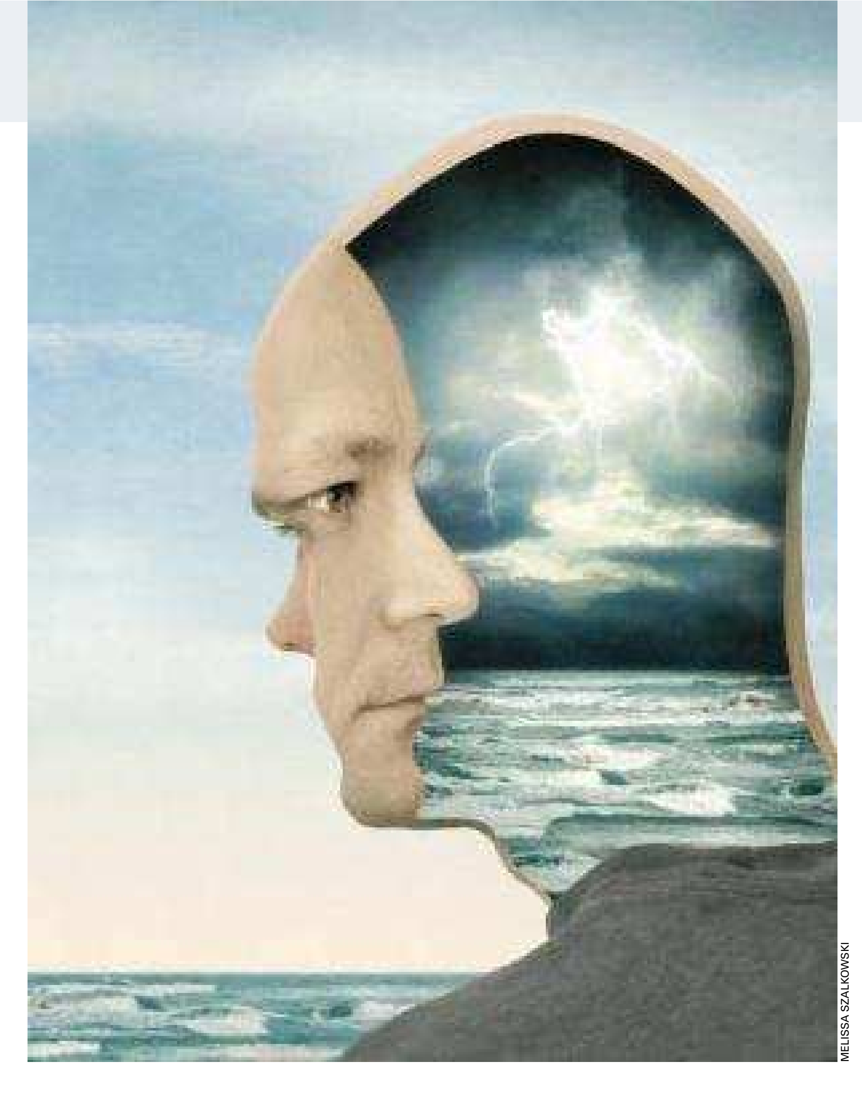
Auf ein mutiertes Gen gehen noch andere Störungen zurück, beispielsweise die Chorea Huntington, auch erblicher Veitstanz genannt. Deren Auswirkungen auf das Verhalten können genauso drastisch sein wie im Fall von Chuck und Arthur.

Im Körper des falschen Geschlechts

Genveränderungen sind aber längst nicht alles in der Flut dieser bemerkenswerten Erkenntnisse, auch dramatische Wechselwirkungen zwischen Genen und Umwelt treten zu Tage. In einer neueren Studie berichteten Avshalom Caspi und seine Mitarbeiter am King's College in London über eine Genvariante, die das Risiko erhöht, an einer so genannten unipolaren Depression zu erkranken. Das Gen codiert für ein Protein, das mit dem Nervenbotenstoff Serotonin zu tun hat. Diesen Neurotransmitter beeinflussen Prozac (Fluctin) und ähnliche Antidepressiva. Es handelt sich hier jedoch nicht um ein Beispiel für einfachen genetischen Determinismus, für »Gene als Schicksal«. Vielmehr erhöht dieser Gendefekt das Risiko, an einer Depression zu erkranken, nur in einer belastenden Umwelt. Unabhängig von dem Londoner Team zeigte die Gruppe um Klaus-Peter Lesch an der Universität Würzburg, dass Glucocorticoide, eine wichtige Klasse von Stresshormonen, die Aktivität dieses Gens regeln.

Einige dieser Erkenntnisse illustrieren den Einfluss der Umwelt auf die Ausformung unseres Gehirns und damit unserer Persönlichkeit. Beispielsweise kann ein nachhaltiges Trauma zweierlei bewirken: Zum einen schrumpfen Neuronen im Hippocampus am Innenrand des Schläfenlappens. Dieses Hirnareal spielt eine entscheidende Rolle beim Lernen und beim Gedächtnis. Zum anderen expandieren Neuronen in der Amygdala, dem Mandelkern, der bei Angst und Furcht bedeutsam ist.

Andere Befunde lassen sich zwar nicht so ohne weiteres in die Debatte über Anlage oder Umwelt, angeboren oder erworben, einordnen, beleuchten jedoch neue Aspekte der Tatsache, dass wir Produkte unseres Gehirns sind. Ein Beispiel liefert eine Untersuchung unter anderem von Frank Kruijver am niederländischen Hirnforschungsinstitut in Amsterdam. Seit einiger Zeit ist bekannt, dass sich die Neuronenzahl in einem Hirnkern mit dem Kürzel BNST (englisch: *bed nucleus of the stria terminalis*) bei Männern und Frauen durchgängig unterscheidet. Kruijver zählte die Ner- ▷



MELISSA SZALKOWSKI

▲ **Wachsende Einsichten in die Neurobiologie psychischer Störungen fordern ein Überdenken, was Willensfreiheit und Verantwortung anbelangt.**

venzellen an dieser Stelle im Gehirn obduzierter Menschen. Darunter befanden sich auch solche von Transsexuellen. Statt der für ihr Geburtsgeschlecht typischen Neuronenanzahl besaßen diese Menschen eine Menge typisch für das Geschlecht, zu dem sie sich immer zugehörig gefühlt hatten. Die Person brauchte nicht einmal ihr Geschlecht faktisch geändert zu haben, sei es im äußeren Verhalten oder sogar durch eine Hormonbehandlung.

Auf jeden von uns trifft die eine oder andere Diagnose aus diesem Grabbelsack neurobiologischer Abnormitäten zu

Man stelle sich das einmal vor: Chromosomen, Keimdrüsen, Genitalien und Hormone eben dieser Menschen ordnen sie einem bestimmten Geschlecht zu. Auch die Gesellschaft behandelt sie nach dem »biologischen« Geschlecht. Doch sie selbst und ihr BNST bestehen auf dem anderen. Ihr eigentliches Problem ist demnach nicht, das falsche Geschlecht zu haben – sie besitzen vielmehr den Körper des falschen Geschlechts.

Wie merkwürdig finden Sie das Folgende: Manche Menschen mit Apotemnophilie haben das sexuell getönte Verlangen, amputiert zu sein. Sie haben entsprechende Fantasien, planen insgeheim Unfälle, die eine Amputation nötig machen würden, und bringen es häufig tatsächlich so weit. Der Psychiater Carl Elliot an der Medizinischen Fakultät der Universität von Minnesota in Minneapolis sprach hier von »einer neuen Weise, verrückt zu sein«.

Zwangsstörung, Tourette-Syndrom, Borderline-Persönlichkeit, selbstunsichere Persönlichkeit, wahnhafte Religiosität bei Schläfenlappenepilepsie – für all diese und viele andere Leiden suchen und finden wir oft Erklärungen auf neurowissenschaftlicher Grundlage.

Diese Kollektion mag wie ein biologisches Kuriositätenkabinett erscheinen. Dennoch sind solche Störungen und die an ihnen gewonnenen Erkenntnisse von Bedeutung. Sie entscheiden über vieles:

- wie wir Bildung vermitteln, wem wir sie vermitteln und wen wir stillschweigend aufgeben,
- wem wir gegen seinen Willen Medikamente verabreichen,
- an wem wir, wenn in einem Staat die Todesstrafe gilt, diese vollziehen.

Während ich an diesem Essay schrieb, bereitete ich mich zugleich auf meine Aussage als Gutachter in einem Prozess vor, bei dem dem Angeklagten die Todesstrafe droht. Er hatte derart entsetzliche, derart albtraumhafte Taten begangen, dass mir schon beim Aktenstudium schlecht wurde und ich den ängstlichen Drang verspürte, einen Blick in die Zimmer meiner Kinder zu werfen, um mich zu vergewissern, dass sie sicher schlafen. Vor Gericht werde ich aber darlegen, dass die Todesstrafe für einen Menschen, der eine schwere, die Impulskontrolle beeinträchtigende Kopfverletzung erlitten hat, unangebracht ist.

Den Großteil der dargestellten Zusammenhänge kennt man erst seit kurzem. Bei vielen anderen biologisch bedingten Entgleisungen eines Menschen hat man noch nicht mehr in der Hand als bloß einen passenden Namen dafür. Mit der Zeit, wenn es immer mehr benannte Störungen und immer mehr Einsichten in die dahinter stehenden neurobiologischen Zusammenhänge gibt, werden beunruhigende Dinge geschehen.

Reparieren wollen, was gar nicht kaputt ist

Als Erstes wird die Neurobiologie nicht mehr die Wissenschaft dieser anderen Menschen und deren Krankheiten sein, sondern ein Beschreibungsinstrumentarium für uns alle, weil auf jeden von uns die eine oder andere Diagnose aus diesem Grabbelsack neurobiologischer Abnormitäten zutrifft. Diese Konsequenz wird in den Augen jedes vernünftig denkenden Menschen die Begriffe von freiem Willen und Verantwortung in Frage stellen.

Irgendwann werden wir diese Probleme ansatzweise zu beheben wissen – und auch dieser Fortschritt birgt Gefahren. Eine davon ist die Versuchung, Dinge zu reparieren, die gar nicht kaputt sind, sie sogar dauerhaft, über zukünftige Generationen hinweg, zu »reparieren«. Genozide machten sich in der Vergangenheit an äußeren Merkmalen von Menschen fest; zweifelsohne sind wir fähig, auch auf Grund von neurobiologischen Merkmalen Genozide zu begehen. Und im Alltagsleben bestehen reichlich Befürchtungen einer Diskriminierung – dass wegen solcher Kriterien die »falsche Sorte« Mensch etwa keine Krankenversicherung, angemessene Wohnung oder Arbeit erhält.

Der wissenschaftliche Fortschritt gibt jedoch andererseits auch Anlass zu Optimismus. Wenn wir alle einige dieser Etiketten und Diagnosen erhalten, wird etwas anderes bedeutungslos: die feste, selbstsicher abstempelnde Mauer, die »gesund« von »krank« scheidet. Vergessen wir sie. Wenn wir erst in einer Welt der medizinischen Kontinuen leben, muss die einzige wissenschaftlich zu rechtfertigende Reaktion darauf mehr Mitgefühl und Toleranz sein.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Robert M. Sapolsky ist Professor für Biowissenschaften und Neurologie an der Universität Stanford in Kalifornien sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter des Nationalmuseums von Kenia. Er promovierte 1984 in Neuroendokrinologie an der Rockefeller-Universität in New York. Sapolskys Forschungsinteressen reichen von untergehenden Nervenzellen über Gentherapie bis zur Physiologie von Primaten.

Warum Zebras keine Migräne kriegen: Wie Stress Menschen krank macht. Von Robert M. Sapolsky, München, Piper 1996

The trouble with testosterone and other essays on the biology of the human predicament. Von Robert M. Sapolsky, New York, Scribner 1997

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Suche nach der Nadel in stellaren Staubwolken

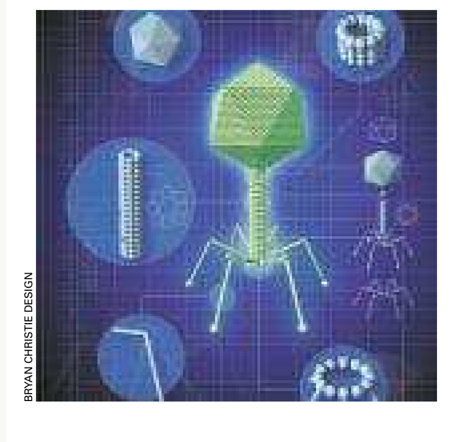
Riesenplaneten zu finden, die um ferne Sonnen kreisen, ist vergleichsweise einfach. Doch um zu klären, ob fremde Planetensysteme auch kleinere Himmelskörper enthalten wie Kometen und Asteroiden, müssen Astronomen vor allem eines tun: im Staub herumstochern

DON DIXON

WEITERE THEMEN IM OKTOBER

Urmenschen von Thüringen hatten schon Kultur

Der *Homo erectus* hinterließ vor rund 400 000 Jahren in Thüringen ein jahrelang bewohntes Lager. Die Siedlung weist diesen Menschen als geschickten Handwerker und versierten Jäger großer Tiere aus. Selbst symbolhaftes Denken war ihm offenbar nicht fremd



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Zusammenbau lebender Mikromaschinen

Geningenieure versuchen, mittels austauschbarer Module Wunschorganismen zu konstruieren. Die neuen Lebewesen sollen gute Dienste leisten: Schwermetalle abbauen, Medikamente produzieren und Krebs bekämpfen



MIT FREUNDL. GENEHM. PROF. GOTTSTEIN

Menschenevolution aus der Wurmperspektive

Der Mensch holte sich den Bandwurm nicht erst von seinen Haustieren. Vielmehr gewährt er ihm seit Hunderttausenden von Jahren Unterschlupf – und beste Evolutionsbedingungen

Freuds unerwartete Wiederkehr

Der Begründer der Psychoanalyse erhält postume Unterstützung durch moderne Hirnforscher



DUSAN PETRICIC